

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-023887

(43)Date of publication of application : 26.01.2001

(51)Int.Cl.

H01L 21/027  
G02B 13/14  
G02B 13/24  
G03F 7/20

(21)Application number : 11-195275

(71)Applicant : NIKON CORP

(22)Date of filing : 09.07.1999

(72)Inventor : TSUKAMOTO HIROYUKI  
TAKAHASHI TETSUO

(54) PROJECTION OPTICAL SYSTEM, PROJECTION ALIGNER EQUIPPED THEREWITH, AND EXPOSING METHOD

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To enable a projection optical system to obtain an extremely stable image forming property even when the system projects light, by specifying the radii of curvature and thicknesses of all single lens components existing within a distance range from a second surface toward a first surface along the optical axis and the intervals among the lens components along the optical axis.

SOLUTION: A projection optical system projects the image of the pattern formed on a first surface irradiated with ultraviolet rays upon a second surface. The distance 1 from the second surface to the surface of a lens, the maximum value  $y_{\text{imax}}$  of the distance from the optical axis to an area where a final or intermediate image is formed measured in the vertical direction, the radii of curvature (r) of all single lens components existing within  $5y_{\text{imax}}$ -distance range from the second surface toward the first surface along the optical axis, and the thicknesses (d) of the lens components are set to meet the conditions of the expressions 1 and 2. In addition, the interval Bf between the surface of the lens of the nearest optical system to the second surface and the second surface along the optical axis is set to meet the condition of the expression 3.

$$r > 3l$$

1

$$d < 1.2l$$

2

$$Bf \leq y_{\text{imax}}$$

3

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2000 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2001-23887

(P2001-23887A)

(43)公開日 平成13年 1月26日 (2001.1.26)

(51)Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テ-マ-ト(参考)
H 0 1 L 21/027		H 0 1 L 21/30	5 1 5 D 2 H 0 8 7
G 0 2 B 13/14		G 0 2 B 13/14	5 F 0 4 6
13/24		13/24	
G 0 3 F 7/20	5 2 1	G 0 3 F 7/20	5 2 1

審査請求 未請求 請求項の数6 O L (全 27 頁)

(21)出願番号 特願平11-195275

(22)出願日 平成11年 7月 9日 (1999.7.9)

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 塚本 宏之

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(72)発明者 高橋 哲男

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(74)代理人 100077919

弁理士 井上 義雄

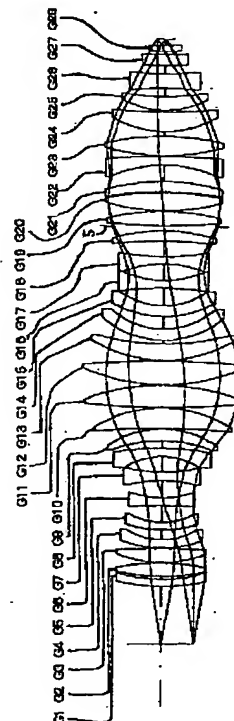
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 投影光学系、該光学系を備える投影露光装置及び露光方法

(57)【要約】

【課題】光を照射した場合でも極め安定した結像特性を有する投影光学系等を提供すること。

【解決手段】紫外光で照射された第1面3上のパターンの像を第2面9上に投影するための投影光学系であって、第2面からレンズ面までの距離を $l$ 、最終像又は中間像が形成される領域の光軸から垂直方向に測った距離の最大値を $y_{imax}$ 、前記第2面から光軸に沿って前記第1面の方向に向って $5y_{imax}$ の距離の範囲内に存在する全ての単レンズ成分の曲率半径を $r$ 、該レンズ成分の厚さを $d$ とそれぞれしたとき、 $|r| > 3l$ 、 $d < 1.2l$ の条件を満足し、かつ、前記投影光学系の最も前記第2面側のレンズ面と前記第2面との光軸に沿った間隔を $Bf$ としたとき、 $Bf \leq y_{imax}$ の条件を満足する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 紫外光で照射された第1面上のパターンの像を第2面上に投影するための投影光学系であって、第2面からレンズ面までの距離を1、最終像又は中間像が形成される領域の光軸から垂直方向に測った距離の最大値を $y_{imax}$ 、第2面から光軸に沿って第1面の方向に向って $5y_{imax}$ の距離の範囲内に存在する全ての単レンズ成分の曲率半径を $r$ 、該レンズ成分の厚さを $d$ とそれぞれしたとき、

$$|r| > 3l \quad (1)$$

$$d < 1.2l \quad (2)$$

の条件を満足し、かつ、

$$\Delta s a_g^G = \left| (NA)^3 \left( \sum_{i=g}^n (I_i^G - I_i) \right) \times \frac{d_g}{y_{imax}} \frac{R_{g1}}{R_{gs}} \frac{\bar{h}_{g2}/h_{g2}^2}{|\bar{h}|_{max}/|h|_{max}^2} \right| / \Omega < 200 \quad (nm/W) \quad (6)$$

の条件を満足することを特徴とする投影光学系。ここで、

$n$ ：前記投影光学系を構成する単レンズ成分の総数、

$g$ ：第1面側から数えたレンズ面の順番、

$NA$ ：前記投影光学系の開口数、

$d_g$ ：第1面側から数えて $g$ 番目のレンズ成分の中心厚

$\bar{h}_{g2}$ ：近軸主光線の $g$ 番目のレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値、

$h_{g2}$ ：近軸周辺光線の $g$ 番目のレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値、

$|\bar{h}_{max}|$ ：近軸主光線の前記投影レンズ系を構成するレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値のうちの最大値、

$|h_{max}|$ ：近軸周辺光線の前記投影レンズ系を構成するレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値のうちの最大値、

$\Omega$ ：第2面における照明光の強度、

$I_g, I_g$ ：球面収差係数、

球面収差係数は、次式(7)、

$$I_g = h_{g1}^4 A_{g1} + h_{g2}^4 A_{g2} \quad (7)$$

$$A_k = \left\{ \frac{n_k}{n'_k(n'_k - n_k)} \right\}^2 \varphi_k^3 - \frac{n'_k + 3n_k}{n_k'^2(n'_k - n_k)} \varphi_k^2 \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right) + \frac{2n'_k + 3n_k}{n_k'^2 n_k} \varphi_k \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^2 - \frac{n_k'^2 - n_k^2}{n_k'^2 n_k^2} \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^3 + \psi \quad (8)$$

であり、式(8)において、

$n$ ：媒質の照明光の波長における屈折率であり、符号 $n$ に「'」を付したものは光路に沿ってレンズ面の後(第2面側)、符号 $n$ のみのものはレンズ面の前(第1面側)での量であることをそれぞれ示す。

【請求項3】 紫外光で照射された第1面上のパターン

前記投影光学系の最も第2面側のレンズ面と第2面との光軸に沿った間隔を $Bf$ としたとき、

$$Bf \leq y_{imax} \quad (3)$$

の条件を満足することを特徴とする投影光学系。

【請求項2】 紫外光で照射された第1面上のパターンの像を第2面上に投影するための投影光学系であって、

最終像又は中間像が形成される領域の光軸から垂直方向に測った距離の最大値を $y_{imax}$ としたとき、

第2面から光軸に沿って第1面の方向に向って $20y_{imax}$ の範囲内に存在する全ての単レンズ成分が、

さ、

$R_{g1}$ ：第1面側から数えて $g$ 番目のレンズ成分の両面の有効半径のうち大きい有効半径、

$R_{gs}$ ：第1面側から $g$ 番目のレンズ成分の両面の有効半径のうち小さい有効半径、

で示され、式(7)において、

$g1, g2$ ：レンズ成分の2つの面、また、

の像を第2面上に投影するための投影光学系であって、最終像又は中間像が形成される領域の光軸から垂直方向に測った距離の最大値を $y_{imax}$ としたとき、第2面から光軸に沿って第1面の方向に向って $20y_{imax}$ の範囲内に存在する全ての単レンズ成分が、

$$\Delta s a_g^{G,E} = \left| (NA)^3 \left( \sum_{i=g}^n \{ (I_i^G - I_i) + (I_i^E - I_i) \} \right) \times \frac{d_g}{y_{i \max}} \frac{R_{g1}}{R_{g2}} \frac{\bar{h}_g / h_g^2}{|\bar{h}|_{\max} / |h|_{\max}^2} \right| / \Omega < 200 \quad (nm/W) \quad (16)$$

の条件を満足することを特徴とする投影光学系。ここで、

n：前記投影光学系を構成する単レンズ成分の総数、

g：第1面側から数えたレンズ面の順番、

NA：前記投影光学系の開口数、

d<sub>g</sub>：第1面側から数えてg番目のレンズ成分の中心厚

$\bar{h}_{g2}$ ：近軸主光線のg番目のレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値、

$h_{g2}$ ：近軸周辺光線のg番目のレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値、

$|\bar{h}_{\max}|$ ：近軸主光線の前記投影レンズ系を構成するレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値のうちの最大値、

$|h_{\max}|$ ：近軸周辺光線の前記投影レンズ系を構成するレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値のうちの最大値、

Ω：第2面における照明光の強度

I<sub>g</sub><sup>G</sup>、I<sub>g</sub><sup>E</sup>及びI<sub>g</sub>：球面収差係数、

該球面収差係数は、

$$I_g = h_{g1}^4 A_{g1} + h_{g2}^4 A_{g2} \quad (7)$$

$$A_k = \left\{ \frac{n_k}{n'_k(n'_k - n_k)} \right\}^2 \varphi_k^3 - \frac{n'_k + 3n_k}{n_k'^2(n'_k - n_k)} \varphi_k^2 \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right) + \frac{2n'_k + 3n_k}{n_k'^2 n_k} \varphi_k \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^2 - \frac{n_k'^2 - n_k^2}{n_k'^2 n_k^2} \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^3 + \psi \quad (8)$$

であり、式(8)において、

n：媒質の照明光の波長における屈折率であり、符号nに「'」を付したものは光路に沿ってレンズ面の後(第2面側)、符号nのみは面の前での量であることを示す。

【請求項4】 紫外光で照射された第1面上のパターンの像を第2面上に投影するための投影光学系であって、最終像又は中間像が形成される領域の光軸からの距離の最大値を $y_{i \max}$ としたとき、前記最終像面又は中間像面からの距離が $20y_{i \max}$ 以内に存在する少なくとも一部の空間に対して媒質の対流を行う強制対流部を有していることを特徴とする投影光学系。

【請求項5】 所定のパターンが形成されたマスクを照明するための照明光学系と、前記第1面上に配置された前記マスクの前記所定のパターンの像を前記第2面上に配置された感光性基板上に投影するための請求項1乃至4のいずれか一項に記載の投影レンズ系とを備えていることを特徴とする投影露光装

置、

R<sub>g1</sub>：第1面側から数えてg番目のレンズ成分の両面の有効半径のうちの大きい有効半径、

R<sub>g2</sub>：第1面側からg番目のレンズ成分の両面の有効半径のうちの小さい有効半径、

で示され、式(7)において、g1,g2：レンズ成分の2つの面、

置。

【請求項6】 照明光を生成する工程と、前記照明光により所定のパターンが形成されたマスクを照明する工程と、請求項1乃至4のいずれか一項に記載の投影レンズ系を用いて、前記第1面上に配置された前記マスクの前記所定のパターンの像を前記第2面上に配置された感光性基板上へ投影する工程とを含むことを特徴とする露光方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、第1面(マスク面)上に形成されたパターンを第2面(ウエハ面)に投影するための投影光学系、特にマスク上の実質的な照明領域が投影光学系の光軸に対して回転非対称であり、かつ、投影光学系の最終面から感光性基盤であるウエハ面までの距離が比較的小さい投影光学系、該投影光学系を備える投影露光装置及び露光方法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】従来、半導体素子等を製造するためのフォトリソグラフィ工程では、マスクとしてのレチクル上のほぼ正方形上の照射領域内のパターン像を投影光学系を介して感光性基盤としてのウエハ上の1つのショット領域へ一括的に転写した後に、投影光学系の光軸と直行する面内でウエハを逐次二次元的に移動させて次のショット領域にマスクパターン像を一括的に転写する工程を繰返すステップ・アンド・リピート方式（一括露光方式）の投影露光装置が多用されている。

【0003】さらに近年、半導体素子等のチップパターンの大型化に対応するために、より大きな面積のレチクルのパターンをウエハ上の各ショット領域に転写することが求められている。しかし、広い露光フィールドの全面にわたって歪曲収差（ディストーション）やコマ収差等の諸収差を所定の許容値以下に抑制した投影光学系の設計及び製造は困難である。このため、最近ではレチクル上の長方形の照明領域内のパターンを投影光学系を介してウエハ上に投影した状態で、レチクルとウエハとを投影光学系に対して投影倍率を速度比として同期走査するステップ・アンド・スキャン方式（走査露光方式）の投影露光装置が主流になりつつある。走査露光方式の投影露光装置は、投影光学系の有効露光フィールドにほぼ内接するスリット状の露光領域に対してウエハを走査しながら露光するため、投影光学系の有効露光フィールドの直径を最大限に利用できる。また、スリット状の露光領域内で良好な結像特性が得られれば良く、かつ走査方向への転写パターンの長さはその有効露光領域フィールドの直径よりも長くできるため、結果として大面積のレチクルのパターンを良好な結像特性でウエハ上に転写できる。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】上記投影露光装置を用いたパターンの投影露光に際しては、投影光学系に対して高いエネルギーを有する照明光を照射することが望ましい。しかもスループットの向上を考えると、単位時間に照射するエネルギーをより大きくすることが好ましい。

【0005】現在、露光光の光源としてi線（波長365nm）の超高圧水銀ランプから波長248nmのKrFエキシマレーザに主流が移りつつあり、更に波長193nmのArFエキシマレーザも開発段階から量産段階に移行しつつある。また、波長157nmのF<sub>2</sub>レーザに関しても広く検討が行われている。

【0006】投影光学系を構成するレンズ成分は、表面の薄膜又は硝材の内部において僅かながら露光光の吸収が起こる。例えば、露光光としてi線を用いると、使用できる硝材の種類が多いので、硝材によっては表面の薄膜又は硝材内部において比較的大きい吸収が起こる可能性がある。但し、i線用のレンズ成分では、焼き付ける

パターンの線幅がさらに短波長の場合よりも大きいので許容される収差量が比較的緩い。また、波長248nm（KrFエキシマレーザ）の露光光に対しては、かなりガラス製造技術や薄膜製造技術が確立しつつあるので、吸収率はかなり低いものを実現できると思われる。さらに、波長193nmの露光光に対しても、ガラス製造技術はKrFエキシマレーザに遜色ないレベルまで達しつつあるが、許容される収差量は焼き付け時の標準解像力が最も細い（小さい）ために、厳しくなる。また、露光光の波長が157nmになると、ガラスや薄膜の製造技術が確立しておらず、硝材や薄膜によりかなりの量の吸収が起こるものと考えられる。

【0007】レンズ表面の薄膜や硝材内部で露光光が吸収されると、レンズ成分の内部に温度分布を生じる。特開平9-213611号公報に開示された一括露光方式の投影露光装置に比較して走査露光方式の投影露光装置では、吸収による温度分布の回転非対称性が大きくなる。また、温度分布に起因して回転非対称な熱変形や硝材の屈折率分布が生じるが、これによって生じる収差変動は、今日のような高解像力、かつ高精度のパターン転写が要求される条件下では容認できない状態になっている。

【0008】次に、照射によって生じる収差について説明する。回転非対称な歪曲収差（ディストーション）は特開平8-203805号公報、回転非対称な非点収差は特願平5-323721に記載されている方法で、使用条件に合わせてある程度のオフセットをかけることは可能である。しかし、回転非対称なコマ収差については、単純な偏芯コマ収差であればともかく、それ以外の回転非対称な要素を補正するのは非常に困難であるのが現状である。そこで、本発明では、回転非対称なコマ収差に着目して以下の説明を進める。

【0009】近年、投影露光装置では変形照明法又は位相シフトマスク法などの像改良という名で総称される各種の結像法が採用されている。そして、結像法が異なると収差にも違いが生じるので、特定の結像法で収差を良好に補正しても、他の結像法では収差が悪いという問題が生じてしまう。

【0010】さらに、エキシマレーザのようなパルス発光のレーザ光を使用する投影光学系においては、レンズ成分中のパルスレーザ光に照射されている部分のみ屈折率が上昇する、所謂ラジエーション・コンパクション(Radiation Compaction)という現象も起こる。ラジエーション・コンパクションによるレンズ成分の屈折率の回転非対称な分布での部分的な上昇は、特に投影光学系の収差に極めて悪い影響を及ぼす。

【0011】そして、このような原因に起因する収差への対応方法も幾つか提案されている。特開平9-213611号公報では露光中に投影光学系を回転することや、特開平10-050585号公報では露光波長と別の波長の光で投影レンズを意図的に加熱することで回転対称な光照射を実現

すること、特開平10-242048号公報では照射変動に対応した非球面レンズを予め作成しておき、必要に応じてこの非球面レンズを動かすことなどが提案されている。

【0012】しかしながら、上記のような対応方法を実施するためには、かなりの負荷が予想される。例えば、特開平10-242048号公報に開示されている回転非対称な非球面を作成するためには、専用の製造装置が必要になる。さらに、その非球面を照射時に適宜偏芯させるには高精度な偏芯調整機構も必要になる。

【0013】一方、高精度の収差補正を行うため、又は高NAを実現するために投影光学系は、レンズ系全長とレンズ系を構成する各レンズ成分とが巨大化し、かつ、レンズ成分の枚数も増加する傾向にある。この傾向を抑えるための有力な方法の一つとして、マスク側又は像側の作動距離（投影レンズの最外面からマスク又は像面までの距離）を小さくする事がある。但し、作動距離が小さい場合、その最外面近傍に位置するレンズ成分では照射時の収差発生が特に大きくなる傾向がある。

【0014】本発明は上記の問題に鑑みてなされたものであり、光を照射した場合でも極め安定した結像特性を有し、回転非対称な露光領域を有する投影露光装置、特に、走査露光方式の投影露光装置に好適な投影光学系等を提供することを目的とする。

【0015】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために、本発明（CL1）は、紫外光で照射された第1面上のパターンの像を第2面上に投影するための投影光学系であって、第2面からレンズ面までの距離を1、最終像又は中間像が形成される領域の光軸から垂直方向に測った距離の最大値を $y_{imax}$ 、第2面から光軸に沿って第1面の方向に向って $5y_{imax}$ の距離の範囲内に存在する全ての単レンズ成分の曲率半径を $r$ 、該レンズ成分の厚さを $d$ とそれぞれしたとき、

【0016】

【数1】

$$|r| > 3l \quad (1)$$

【0017】

【数2】

$$d < 1.2l \quad (2)$$

$$\Delta s a_g^g = \left| (NA)^3 \left( \sum_{i=g}^n (I_i^g - I_i) \right) \times \frac{d_g}{y_{imax}} \frac{R_{g1}}{R_{gs}} \frac{\bar{h}_{g2}/h_{g2}^2}{|\bar{h}|_{max}/|h|_{max}^2} \right| / \Omega < 200 \quad (nm/W) \quad (6)$$

【0028】の条件を満足することを特徴とする投影光学系を提供する。ここで、

$n$ ：前記投影光学系を構成する単レンズ成分の総数、

$g$ ：第1面側から数えたレンズ面の順番、

$NA$ ：前記投影光学系の開口数、

$d_g$ ：第1面側から数えて $g$ 番目のレンズ成分の中心厚

【0018】の条件を満足し、かつ、前記投影光学系の最も第2面側のレンズ面と第2面との光軸に沿った間隔を $Bf$ としたとき、

【0019】

【数3】

$$Bf \leq y_{imax} \quad (3)$$

【0020】の条件を満足することを特徴とする投影光学系を提供する。

【0021】また、本発明（CL2）は、前記投影光学系を構成する各レンズ成分が、

【0022】

【数4】

$$\left| \frac{dn}{dT} \frac{(2a/d)}{\lambda} \right| > 5 \times 10^{-8} \quad (W^{-1}) \quad (4)$$

【0023】の条件を満足することが望ましい。ここで、

$dn/dT$ ：前記各レンズ成分の硝材の屈折率温度変化係数、

$d$ ：前記各レンズ成分の中心厚さ、

$\lambda$ ：前記硝材の熱伝導率、

$a$ ：照射する光の波長における前記レンズ成分のレンズ表面1面あたりの硝材の実効吸収係数であり、硝材表面での吸収率を $a_s$ 、硝材内部での単位長さ当りの吸収率を $a_g$ とそれぞれしたとき、

【0024】

【数5】

$$a = a_s + \frac{d}{2} a_g \quad (5)$$

【0025】で定義される。

【0026】また、本発明（CL3）では、紫外光で照射された第1面上のパターンの像を第2面上に投影するための投影光学系であって、最終像又は中間像が形成される領域の光軸から垂直方向に測った距離の最大値を $y_{imax}$ としたとき、第2面から光軸に沿って第1面の方向に向って $20y_{imax}$ の範囲内に存在する全ての単レンズ成分が、

【0027】

【数6】

さ、

$R_{g1}$ ：第1面側から数えて $g$ 番目のレンズ成分の両面の有効半径のうち大きい有効半径、

$R_{gs}$ ：第1面側から $g$ 番目のレンズ成分の両面の有効半径のうち小さい有効半径、

$\bar{h}_{g2}$  : 近軸主光線の  $g$  番目のレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値、

$h_{g2}$  : 近軸周辺光線の  $g$  番目のレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値、

$|h_{\max}|$  : 近軸主光線の前記投影レンズ系を構成するレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値のうちの最大値、

$|h_{\max}|$  : 近軸周辺光線の前記投影レンズ系を構成するレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値のうちの最大値、

【0029】 $\Omega$  : 第2面における照明光の強度、

【0031】で示され、式(7)において、

$I_g^0, I_g$  : 球面収差係数、

$g1, g2$  : レンズ成分の2つの面、また、

球面収差係数は、次式(7)、

【0032】

【0030】

【数8】

【数7】

$$I_g = h_{g1}^4 A_{g1} + h_{g2}^4 A_{g2} \quad (7)$$

$$A_k = \left\{ \frac{n_k}{n'_k(n'_k - n_k)} \right\}^2 \varphi_k^3 - \frac{n'_k + 3n_k}{n_k'^2(n'_k - n_k)} \varphi_k^2 \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right) + \frac{2n'_k + 3n_k}{n_k'^2 n_k} \varphi_k \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^2 - \frac{n_k'^2 - n_k^2}{n_k'^2 n_k^2} \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^3 + \psi \quad (8)$$

【0033】であり、式(8)において、

$n$  : 媒質の照明光の波長における屈折率であり、符号  $n$  に「 $'$ 」を付したものは光路に沿ってレンズ面の後(第2面側)、符号  $n$  のみのものはレンズ面の前(第1面

側)での量であることをそれぞれ示す。なお、「 $'$ 」については他の量についても同様である。

【0034】さらに式(8)において、

$\varphi_k$  : レンズ面の屈折力であり、前記屈折率  $n$  及びレンズ面の曲率半径  $r_k$  を用いて、

次式(9)で表せる。

【0035】

を光軸からの距離  $\rho$  の関数として、

【数9】

【0037】

$$\varphi_k = (n'_k - n_k)(1/r_k) \quad (9)$$

【数10】

【0036】 $\Psi$  : 非球面項であり、レンズ成分の面形状

$$z(\rho) = \frac{\rho^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)\rho^2/r^2}} + A\rho^4 + B\rho^6 + C\rho^8 \dots \quad (10)$$

【0038】と表したときに、

式(12)、

【0039】

【0042】

【数11】

【数12】

$$\psi = (n' - n) \left( \frac{\kappa}{r^3} + 8A \right) \quad (11)$$

$$\begin{cases} h_{k+1} = h_k - \frac{d_k}{n_k} \alpha'_k \\ \alpha'_{k+1} = \alpha'_k + h_{k+1} \varphi_{k+1} \end{cases} \quad (12)$$

【0040】として示される。

【0041】また、式(8)において、 $\alpha_k$  は近軸周辺光の面への入射角(換算傾角)であり、近軸諸量は以下の

【0043】に従って第1面より順番に光線追跡を行って得られる。

また、式(6)において、 $\sum_{i=g}^n I_i^0$  を求める際には  $g$  番目のレンズ内を光線が通る場

合には、次式(13)、

【0044】

【数13】



$$\begin{cases} h_{k+1} = \cos(x_k d_k) h_k - \frac{1}{N_{10k}} \frac{\sin(x_k d_k)}{x_k} \alpha'_k \\ \alpha'_{k+1} = \cos(x_k d_k) \alpha_k - 2N_{10k} \frac{\sin(x_k d_k)}{x_k} + h_{k+1} \varphi_{k+1} \end{cases} \quad (13)$$

【0045】に従う。式(13)において、

【0046】

【数14】

$$\begin{cases} N_{00} = n + \frac{dn}{dT} \frac{(2a/d)\Omega}{2\pi\lambda} \left( \log \frac{R}{R_{rad}} + \frac{1}{2} \right) \\ N_{10} = -\frac{dn}{dT} \frac{(2a/d)\Omega}{4\pi\lambda R_{rad}^2} \\ x = \sqrt{2|N_{10}/N_{00}|} \end{cases} \quad (14)$$

【0047】である。式(14)において、

dn/dT: 硝材の屈折率温度変化係数、

d: レンズ成分の厚さ、

で表される値である。また、λは硝材の熱伝導率、Rはその面を持つレンズ成分の外半径、R<sub>rad</sub>は面内で照射光に曝される範囲を示す照射半径である。なお、上記の数式中で使うh、α等の近軸追跡諸量については、

【0048】

【数15】

$$\alpha_k \bar{h}_k - \bar{\alpha}_k h_k = 1, \quad \bar{h}_i = 1 \quad (15)$$

【0049】となるような尺度に規格化した値を用いる。kは任意の面、iは像面を示す。

【0050】また、本発明(CL4)では、前記投影光学系を構成する全ての単レンズ成分が上記条件式(6)を満足することが望ましい。

【0051】また、本発明(CL5)では、紫外光で照射された第1面上のパターンの像を第2面上に投影するための投影光学系であって、最終像又は中間像が形成される領域の光軸から垂直方向に測った距離の最大値をy<sub>imax</sub>としたとき、第2面から光軸に沿って第1面の方に向って20y<sub>imax</sub>の範囲内に存在する全ての単レンズ成分が、

【0052】

【数16】

$$\Delta sa_g^{G,E} = \left| (NA)^3 \left( \sum_{i=g}^n \{ (I_i^G - I_i) + (I_i^E - I_i) \} \right) \times \frac{d_g}{y_{imax}} \frac{R_{gi}}{R_{gs}} \frac{\bar{h}_g/h_g^2}{|\bar{h}|_{max}/|h|_{max}^2} \right| / \Omega < 200 \quad (nm/W) \quad (16)$$

【0053】の条件を満足することを特徴とする投影光学系を提供する。ここで、

n: 前記投影光学系を構成する単レンズ成分の総数、

g: 第1面側から数えたレンズ面の順番、

NA: 前記投影光学系の開口数、

d<sub>g</sub>: 第1面側から数えてg番目のレンズ成分の中心厚

さ、

R<sub>g1</sub>: 第1面側から数えてg番目のレンズ成分の両面の有効半径のうちの大きい有効半径、

R<sub>gs</sub>: 第1面側からg番目のレンズ成分の両面の有効半径のうちの小さい有効半径、

$\bar{h}_{g2}$ : 近軸主光線のg番目のレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値、

$h_{g2}$ : 近軸周辺光線のg番目のレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値、

$|\bar{h}_{max}|$ : 近軸主光線の前記投影レンズ系を構成するレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値のうちの最大値、

$|h_{max}|$ : 近軸周辺光線の前記投影レンズ系を構成するレンズ成分における光路に沿った第2面側のレンズ面での値のうちの最大値、

【0054】Ω: 第2面における照明光の強度

I<sub>g</sub><sup>0</sup>、I<sub>g</sub><sup>E</sup>及びI<sub>g</sub>: 球面収差係数、

該球面収差係数は、上記式(7)で表されるものである。

【0055】また、I<sub>k</sub><sup>E</sup>を計算する際には、上記のI<sub>k</sub>を求める手順において、r<sub>k</sub>、d<sub>k</sub>の代わりに、

【0056】

【数17】

$$r_{ek} = (1 + \alpha_l \Delta T(0)) r_k, \quad d_{ek} = (1 + \alpha_l \Delta T(0)) d_k \quad (17)$$

【0057】を使い、また、レンズの光路に沿って前側

の間隔から( $d_{ek}-d_k$ )を差し引くものとする。

ここで、 $\alpha_l$ は $\alpha_l = dl/(l \cdot dT)$ で表される硝材の線膨張率である。

【0058】また、本発明(C L 6)では、前記投影光学系を構成する全ての単レンズ成分が上記条件式(16)を満足することが望ましい。

離が $20y_{imax}$ 以内に存在する少なくとも一部の空間に対して媒質の対流を行う強制対流部を有していることが望ましい。

【0059】また、本発明(C L 7)では、上記C L 3乃至6のいずれかに一つに記載の投影レンズ系において、前記投影光学系の最も第2面側のレンズ面と前記第2面との光軸に沿った間隔をB f、最大像高を $y_{imax}$ としたとき、条件式(3)を満足することが望ましい。

【0068】また、本発明(C L 16)では、所定のパターンが形成されたマスクを照明するための照明光学系と、前記第1面上に配置された前記マスクの前記所定のパターンの像を前記第2面上に配置された感光性基板上に投影するための上記C L 1乃至15のいずれか一つに記載の投影レンズ系とを備えていることを特徴とする投影露光装置を提供する。

【0060】また、本発明(C L 8)では、上記C L 3乃至6のいずれかに一つに記載の投影レンズ系において、上記式(4)の条件を満足することが望ましい。

【0069】また、本発明(C L 17)では、照明光を生成する工程と、前記照明光により所定のパターンが形成されたマスクを照明する工程と、上記C L 1乃至15のいずれか一つに記載の投影レンズ系を用いて、前記第1面上に配置された前記マスクの前記所定のパターンの像を前記第2面上に配置された感光性基板上へ投影する工程とを含むことを特徴とする露光方法を提供する。

【0061】また、本発明(C L 9)では、上記C L 3乃至6のいずれかに一つに記載の投影レンズ系において、前記投影光学系を構成する全てのレンズ成分は石英ガラスからなることが望ましい。

【0070】このように、本発明においては、投影レンズ中の個々のレンズに関して式(1)~(3)の条件を満足させることなどにより式(6)あるいは(16)の値を小さく取るという手段をとる。特に、大きな照射変動の原因となりやすい第2面(ウエハ面)に近く $20y_{imax}$ 以内の位置にあるレンズに対して、第2面(ウエハ面)の近傍においてレンズ内の温度ムラが生じにくいようにレンズを薄くする、レンズにおける収差係数が小さくなるように面の曲率を小さくするなどの対策を取ることで、照射変動が大きく発生するのを防止できる。

【0062】また、本発明(C L 10)では、上記C L 3乃至6のいずれかに一つに記載の投影レンズ系において、前記投影光学系を構成する全てのレンズ成分は螢石からなることが望ましい。

【0063】また、本発明(C L 11)では、上記C L 1乃至10のいずれかに一つに記載の投影レンズ系において、前記紫外光は波長200nm以下であることが望ましい。

【0071】これにより、本発明では、硝材の屈折率温度変化係数が大きいこと、最終レンズ面とウエハ面との距離が小さいことなどの照射変動が大きく出やすい条件下でも発生する収差変動が小さな投影レンズを提供することができる。

【0064】また、本発明(C L 12)では、上記C L 3乃至6のいずれかに一つに記載の投影レンズ系において、第2像面から光軸に沿って距離 $5y_{imax}$ 以内に存在する全てのレンズ面の曲率半径rが条件式(1)を満足することが望ましい。

【0065】また、本発明(C L 13)では、上記C L 3乃至6のいずれかに一つに記載の投影レンズ系において、第2面から光軸に沿って距離 $5y_{imax}$ 以内に存在する全てのレンズ成分の厚さdが条件式(2)を満足することが望ましい。

【0072】また、上記の方法を用いると共に、 $20y_{imax}$ 以内の位置に存在するレンズ成分に対して強制対流を施して、レンズと雰囲気との境界での熱伝達率を大きくしている。これにより、レンズ成分から雰囲気に逃げる熱量が大きくなり、レンズの温度上昇が抑制されて照射による収差変動も小さくなって一層効果的である。

【0066】また、本発明(C L 14)では、紫外光で照射された第1面上のパターンの像を第2面上に投影するための投影光学系であって、最終像又は中間像が形成される領域の光軸からの距離の最大値を $y_{imax}$ としたとき、前記最終像面又は中間像面からの距離が $20y_{imax}$ 以内に存在する少なくとも一部の空間に対して媒質の対流を行う強制対流部を有していることを特徴とする投影レンズ系を提供する。

【0073】

【0067】また、本発明(C L 15)では、上記C L 1乃至15のいずれかに一つに記載の投影レンズ系において、紫外光で照射された第1面上のパターンの像を第2面上に投影するための投影光学系であって、最終像又は中間像が形成される領域の光軸からの距離の最大値を $y_{imax}$ としたとき、前記最終像面又は中間像面からの距

【発明の実施の形態】以下、添付図面に基づいて本発明の実施の形態にかかる投影光学系について説明する。以下の説明は、(A)光照射による屈折率の変化のみを考慮し、硝材の熱膨張による変形を無視した場合と、及び(B)光照射による屈折率の変化と硝材の熱膨張による変形との両者を考慮した場合との2通りについて行う。

【0074】(A) [光照射による屈折率の変化のみを考慮し硝材の熱膨張による変形を無視した場合]

上述したように、レンズの硝材又はレンズ表面の薄膜が露光光を吸収して発熱し、レンズ成分の温度が変化する。そして、レンズ温度が変化すると、屈折率の変化と熱膨張による変形とが生ずる。このため、投影光学系に光を照射すると光照射に起因する収差が発生する。屈折率の変化と熱膨張による変形との何れが収差に及ぼす影響が大きいかは、硝材の種類や使用波長に依存する。例えば、 $\text{SiO}_2$ などの線膨張率の小さな硝材では、熱膨張による変形の影響は屈折率変化による影響と比べて無視できる程度である。

【0075】また、回転非対称に照明する場合には、一般には熱膨張による変形よりも屈折率の変化の方が、補正が困難な回転非対称性の収差を生じ易い。そこで、まず屈折率変化の効果のみに着目することにする。

【0076】なお、上述のラディエーション・コンパクションでは、パルスエネルギーを吸収した硝材の屈折率が上昇すると共に、熱膨張による変形も起きるが、ここでも熱膨張による変形よりも屈折率の変化の方が支配的と考えられる。光照射による収差変動とラディエーション・コンパクションによる収差変動とは振る舞いが非常に似ているので、一方の変動を少なくするような設計を行えば、他方の変動も抑えることができると考えられる。

【0077】光照射に起因する収差を調べるためには、照射中の定常状態におけるレンズの温度分布を求めて、この温度分布を屈折率変化の分布に換算し、その時の収

$$\begin{cases} \Delta T(\rho) = -\frac{w\rho^2}{4\lambda} + \frac{wR_{rad}^2}{2\lambda} \left( \log \frac{R}{R_{rad}} + \frac{1}{2} \right) & (0 \leq \rho \leq R_{rad}) \\ \Delta T(\rho) = -\frac{wR_{rad}^2}{2\lambda} \log \left( \frac{R}{\rho} \right) & (R_{rad} \leq \rho \leq R) \end{cases} \quad (18)$$

【0080】で表すことができる。ここで、 $\Delta T$ は温度変化量、 $w$ は単位体積辺りの発熱率、 $\lambda$ は硝材の熱伝導率、 $R$ はレンズの外半径である。単位体積あたりの発熱率 $w$ は、各レンズ成分への入射光の総量はすべて等しく、一枚のレンズ成分内での照度分布は一様であると考えられる。この $w$ はレンズ成分への照明光の照射面積に反比例する量であり、 $\Omega$ を一枚のレンズ成分への入射光の総量、 $d$ をレンズの厚さ、 $a$ をレンズの実効吸収係数とそれぞれして、

【0081】

【数19】

$$w = \frac{(2a/d)\Omega}{\pi R_{rad}^2} \quad (19)$$

【0082】のように表すことができる。ここで、実効吸収係数 $a$ とは、硝材表面での吸収率 $a_s$ 、硝材内部での単位長さ当りの吸収率 $a_g$ としたとき、

【0083】

差変化量を計算することで実際の収差変動量に近い値を求めることができる。ここで、レンズの温度分布と屈折率変化の分布とを解析的に求めるのはかなり困難なので、以下の順序（ステップ）でモデル化して議論を進めることにする。

【ステップ1】温度分布が軸対称であると仮定して屈折率を求め、屈折率分布型レンズ（以下、「GRINレンズ」という）としてのパラメータを求める。

【ステップ2】変動前の光学系の収差係数を計算する。

【ステップ3】変動後の光学系の収差係数を計算する。

【ステップ4】ステップ2とステップ3との収差係数の差から変動による収差係数の変化量を求め、収差変動量に換算する。

【ステップ5】求めた変動量に、近似の際に省略した要素を補正するファクターを掛ける。

【0078】以下、各ステップごとに内容を説明する。

【ステップ1】まず、レンズ系が円筒形であり、レンズ系の光軸からの距離が $R_{rad}$ 以内の部分の単位体積あたり一定の発熱率で発熱し、円筒の対称軸方向への熱の移動がないものと仮定する。また、境界条件としてレンズの側面が大きな熱浴に接していて、この側面での温度変化が0であるとして熱輸送の方程式を解く。この結果、レンズ内の定常状態での温度変化分布は、軸からの距離の関数として、

【0079】

【数18】

【数20】

$$a = a_s + \frac{d}{2} a_g \quad (5)$$

【0084】で表される量であり、1面あたりに換算したレンズでの発熱率を示す。これを使うと、例えば、レンズ中心での温度上昇量は

【0085】

【数21】

$$\Delta T(0) = \frac{(2a/d)\Omega}{2\pi\lambda} \left( \log \frac{R}{R_{rad}} + \frac{1}{2} \right) \quad (20)$$

【0086】となる。これら仮定の下では、レンズ内の屈折率分布は光軸に対して軸対称となる。したがって、光照射により屈折率が分布したレンズ成分はラジアル(radial)型のGRINレンズとして考えることができる。

【0087】ラジアル型GRINレンズの屈折率分布は、

【0088】

【数22】

$$N_r(\rho) = N_{00} + N_{10}\rho^2 + N_{20}\rho^4 + \dots \quad (21)$$

【0089】と表される。式(18)で、 $0 < \rho < R_{rad}$ では放物線なので、以下の議論では、式(21)における最初

の2項のみを考えることにする。最初の二つの係数の値は、光軸近傍での式(18)より、

【0090】

【数23】

$$\begin{cases} N_{00} = n_0 + \frac{dn}{dT} \Delta T(0) = n_0 + \frac{dn}{dT} \frac{(2a/d)\Omega}{2\pi\lambda} \left( \log \frac{R}{R_{rad}} + \frac{1}{2} \right) \\ N_{10} = \frac{dn}{dT} \cdot \left( -\frac{w}{4\lambda} \right) = -\frac{dn}{dT} \frac{(2a/d)\Omega}{4\pi\lambda R_{rad}^2} \end{cases} \quad (22)$$

【0091】となる。ここで、 $n_0$ は変動前の硝材の屈折率、 $dn/dT$ は屈折率の温度変化係数である。なお、ラジアル型GRINレンズの屈折力は面の屈折力 $\phi_s$ と媒質の屈折力 $\phi_m$ の和となるが両者はそれぞれ

【数25】

$$P = \frac{\phi_s}{N_{00}} + \frac{\phi_m}{N_{00}^2} \quad (24)$$

【0092】

【数24】

$$\phi_s = (N_{00} - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad \phi_m = -2N_{10}d \quad (23)$$

【0093】となる。ここで、 $r_1, r_2$ はレンズ成分の前後の面の曲率、 $d$ はレンズ成分の厚さである。さらに、レンズのベッツバール和は

【0095】と近似される。(槌田, 山本: 光学22(1993)95-100を参照)

【ステップ2】収差係数の変化量を調べるために、変動前の状態での収差係数を調べる。面 $k$ の3次収差係数は、近軸周辺光線の追跡値 $h_k, \alpha_k$ 、面の前後の屈折率 $n_k, n'_k$ 及び面の屈折力 $\phi_k$ 、非球面のパラメータ $\psi$ と、それらの関数である以下の3つのパラメータ、

【0096】

【数26】

$$\begin{cases} A_k = \left\{ \frac{n_k}{n'_k(n'_k - n_k)} \right\}^2 \varphi_k^3 - \frac{n'_k + 3n_k}{n_k'^2(n'_k - n_k)} \varphi_k^2 \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right) + \frac{2n'_k + 3n_k}{n_k'^2 n_k} \varphi_k \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^2 - \frac{n_k'^2 - n_k^2}{n_k'^2 n_k^2} \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^3 + \psi \\ B_k = \frac{n_k}{n_k'^2(n'_k - n_k)} \varphi_k^2 - \frac{n'_k + 2n_k}{n_k'^2 n_k} \varphi_k \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right) + \frac{n_k'^2 - n_k^2}{n_k'^2 n_k^2} \left( \frac{\alpha_k}{h_k} \right)^2 \\ P_k = \frac{\varphi_k}{n'_k n_k} \end{cases} \quad (25)$$

【0097】

及び近軸主光線の追跡値 $\bar{h}_k$ を用いて、

【0098】

【数27】

$$\begin{cases} I_k = h_k^4 A_k \\ II_k = h_k^3 \bar{h}_k A_k + h_k^3 B_k \\ III_k = h_k^2 \bar{h}_k^2 A_k + 2h_k \bar{h}_k B_k + \frac{1}{h_k} \left( \frac{\alpha'_k}{n_k'^2} - \frac{\alpha_k}{n_k^2} \right) \\ IV_k = III_k + P_k \\ V_k = h_k \bar{h}_k^3 A_k + 3\bar{h}_k^2 B_k + 3 \frac{\bar{h}_k}{h_k^2} \left( \frac{\alpha'_k}{n_k'^2} - \frac{\alpha_k}{n_k^2} \right) + \frac{\bar{h}_k}{h_k} P_k - \frac{1}{h_k^2} \left( \frac{1}{n_k'^2} - \frac{1}{n_k^2} \right) \end{cases} \quad (26)$$

【0099】と表せる(松井吉哉: レンズ設計法(共立出

版)p115)。

光学系全体での収差係数は各面の収差係数の和である。近軸追跡はHelmholtz-Lagrange不変量に相当する  $\alpha_k \bar{h}_k - \bar{\alpha}_k h_k$  の値が1、像面での近軸主光線の高さが1になるような初期条件で行う。

【0100】[ステップ3] 照射変動が起きた場合の3次収差係数も上記ステップ2と同様にして求められるが、レンズのGRIN化による影響が、 $\phi$ 、 $P$ 、 $n$ の変化及び、近軸光線の光路の変化として現れる。近軸追跡の際、均質なレンズではレンズの表面である第 $k$ 面から裏面である第 $k+1$ 面への光線の移行は、上記式(12)のようになるが、これがラジアル型GRINレンズ( $N_{10k} < 0$ )の場合は上記式(13)となる。

ここで、 $x_k = \sqrt{2N_{10k} / N_{100k}}$  である。

【0101】これらを利用して、任意のレンズをGRIN化して考えた場合の収差係数を求めることができる(樋田, 山本: 光学22(1993)95-100)。

[ステップ4] そして、変動前と光照射をした後の変動後の収差係数の比較をすれば収差係数の変化量が求められる。ただし、ある1枚のレンズ成分をGRIN化した場合、そのレンズ成分から像側では光路が変化するため、そのレンズ成分による収差変動値を調べるには、GRIN化したレンズ成分だけでなく該GRINレンズより像側に存在するすべてのレンズ成分での収差係数の変化を調べて、総和を求めることが望ましい。例えば $n$ 枚のレンズ成分からなる光学系の $g$ 枚目のレンズ成分が光照射によって加熱されたことによる球面収差量の変化は、

【0102】

【数28】

$$\Delta SA_g = -\frac{1}{2}(NA)^3 \sum_{i=g}^n (I_{GRIN,i} - I_i) \quad (27)$$

【0103】で求められる。

【0104】また、3次収差のみでなく、像面まで近軸追跡を行うことで求められる像面位置や結像倍率等の一次量も変化するので、これらの影響も考慮に入れることが望ましい。

[ステップ5] 上記各ステップの計算では、以下に述べる条件(a)、(b)又は(c)を用いている。

$$\Delta SA'_g = -\frac{1}{2}(NA)^3 \left\{ \sum_{i=g}^n (I_{GRIN,i} - I_i) \right\} \frac{d}{y_{im\max}} \cdot \frac{R_i}{R_s} \cdot \frac{\bar{h}/h^2}{|\bar{h}|_{\max}/|h|_{\max}^2} \quad (29)$$

【0110】の形で評価を行うこととする。

ここで、 $y_{im\max}$ は最大像高、 $R_i, R_s$ はレンズの両面の有効半径のうちのそれぞれ大きい方と小さい方の値、 $\bar{h}_{\max}, h_{\max}$ は光学系全体で近軸周辺光及び主光線の追跡をしたときの最大値である。

・(a) 光軸方向への熱輸送が起らないとしたこと：実際にはレンズ表面の薄膜での吸収による発熱の効果、レンズ表面から雰囲気への放熱の効果などがあるためレンズの厚さ方向の温度分布をもつ。厚いレンズほど定常状態での厚さ方向の温度変化量が大きくなるため、この効果が顕著に現れる。

・(b) レンズ全体が均一に加熱されるとして温度分布を考えたこと：レンズ成分の両面での照射径が大きく異なる場合は実際の温度分布とのずれが大きくなり、これによる影響が生じる。

・(c) 非対称性を考慮していないこと：実際に露光を行う際のフィールド(露光領域)の形は矩形であり、長辺と短辺の差が大きいことが多い。この時、物体面や像面の近傍では照射形状が矩形に近いので、レンズが非軸対称的に加熱され、結果として生じる収差変動にも非軸対称的な効果が加わる。

【0105】このため、上記ステップ4までに得られた値に対して条件(a)～(c)をさらに加味した補正を行うことで実際の値に近い量を求めることができる。

【0106】条件(a)で述べた光軸方向の温度分布の効果の指標としてレンズの厚さ、条件(b)で述べたレンズ外径と照射径の比による効果の指標としてレンズ両面での有効径の比、条件(c)で述べた非軸対称的な効果の指標として近軸主光線の高さを近軸周辺光の高さの2乗で割ったものを用い、各レンズ成分の寄与分について、

【0107】

【数29】

$$\frac{d}{y_{im\max}} \cdot \frac{R_i}{R_s} \cdot \frac{\bar{h}/h^2}{|\bar{h}|_{\max}/|h|_{\max}^2} \quad (28)$$

【0108】という値を、得られた収差変動量に掛け、

【0109】

【数30】

【0111】レンズ成分の近軸追跡値としてはレンズ成

分の裏面(ウエハ側)での値を使用する。なお、本発明

で着目しているのは回転非対称なコマ収差変動であるが、これは、像面上の点から瞳面上において光軸を中心として対称な位置を通る最大NAの2本の光線を入射したときの像面での照射によるズレの差の最大量をコマ収差変動量として扱っている。そこで、実際には式(27)で求めた球面収差変動量の2倍が本発明で着目するコマ収差変動量にほぼ相当する。

【0112】次に、従来の設計手順による光照射の影響を考慮しない投影光学系Aと、上記各ステップに基づいて設計した投影光学系B（第1実施例）とに基づいて両者を比較して説明する。

【0113】[投影光学系A] 照射の影響を特に考慮せずに設計された投影光学系が、投影光学系Aである。図

1は、投影光学系Aのレンズ構成及び光路を示す図である。投影光学系Aの仕様は、ArFエキシマレーザ(波長193.31nm)を光源として使用し、像側のNAは0.6、投影倍率は $-1/4$ 倍、フィールドサイズは25mm×8.8mmの矩形である。また、使用するレンズ枚数は28枚、レンズ成分の硝材はすべてSiO<sub>2</sub>(屈折率1.5603)である。この投影光学系Aのレンズデータ等の諸元値を表1に掲げる。表において、面番号は物体面から数えたレンズ面の順番、rはレンズ面の曲率半径、dはレンズ面の光軸に沿った間隔をそれぞれ示している。なお、以下全ての実施例において同様の符号を用いる。

【0114】

【表1】

面番号	r(mm)	d(mm)	硝材	レンズ半径	
物体面	$\infty$ (平面)	64.212918			
1:	-308.75983	30.981532	SiO <sub>2</sub>	71.65	G1
2:	-299.49610	1.000000			
3:	401.10801	50.000000	SiO <sub>2</sub>	74.56	G2
4:	-381.87751	1.000000			
5:	206.08142	23.520418	SiO <sub>2</sub>	73.30	G3
6:	-949.77590	1.000000			
7:	179.36891	12.600000	SiO <sub>2</sub>	67.21	G4
8:	113.82614	7.277077			
9:	184.48138	12.600000	SiO <sub>2</sub>	61.48	G5
10:	121.01873	19.397581			
11:	-220.06535	12.600000	SiO <sub>2</sub>	57.63	G6
12:	4153.10688	9.420436			
13:	-175.91508	12.600000	SiO <sub>2</sub>	61.16	G7
14:	226.39448	20.762619			
15:	-132.74862	44.648317	SiO <sub>2</sub>	82.38	G8
16:	-481.50046	7.101122			
17:	-252.40629	18.260330	SiO <sub>2</sub>	87.50	G9
18:	-172.02313	1.000000			
19:	-801.04578	20.436281	SiO <sub>2</sub>	97.97	G10
20:	-278.63314	1.000000			
21:	1077.38001	35.164173	SiO <sub>2</sub>	105.66	G11
22:	-251.96330	1.000000			
23:	978.18083	18.067714	SiO <sub>2</sub>	105.36	G12
24:	-1482.71750	10.762117			
25:	$\infty$ (平面)	30.000000	SiO <sub>2</sub>	103.42	G13
26:	$\infty$ (平面)	10.764481			
27:	372.11400	27.492313	SiO <sub>2</sub>	98.91	G14
28:	-6379.77270	9.674197			
29:	229.40198	17.655958	SiO <sub>2</sub>	89.46	G15
30:	419.32750	22.773420			
31:	153.72256	13.500000	SiO <sub>2</sub>	74.57	G16
32:	106.22152	28.576786			
33:	-269.40608	30.000000	SiO <sub>2</sub>	67.01	G17
34:	173.21856	25.198633			
35:	-128.07565	12.600000	SiO <sub>2</sub>	69.99	G18

36:	974.51271	21.087966	
37:	-236.42447	18.000000	SiO <sub>2</sub> 79.42 G19
38:	-205.74440	1.000000	
39:	-1386.91469	60.000000	SiO <sub>2</sub> 96.64 G20
40:	-237.78724	1.000000	
開口絞り: ∞ (平面)		1.000000	
42:	816.97106	20.000000	SiO <sub>2</sub> 103.11 G21
43:	-12116.09997	1.000000	
44:	498.52527	60.000000	SiO <sub>2</sub> 106.11 G22
45:	-408.15309	21.280141	
46:	-197.12533	15.000000	SiO <sub>2</sub> 111.21 G23
47:	-358.81116	1.000000	
48:	1185.68867	34.683865	SiO <sub>2</sub> 114.59 G24
49:	-305.18403	1.000000	
50:	274.74374	30.118442	SiO <sub>2</sub> 108.70 G25
51:	-11658.16317	1.000000	
52:	157.56044	60.000000	SiO <sub>2</sub> 95.02 G26
53:	922.95083	9.565572	
54:	-958.43113	45.000000	SiO <sub>2</sub> 74.62 G27
55:	79.22876	15.353550	
56:	66.84823	56.000000	SiO <sub>2</sub> 45.57 G28
57:	940.51530	12.262042	
像面		∞ (平面)	

【0115】図3は投影光学系Aの横収差を示す図である。収差図からわかるように、光照射の影響を考慮しない限り本光学系の収差は良好に補正されている。

【0116】照射に関する条件としては、照明光のNAは投影光学系の0.6倍、像面上での照度1W/cm<sup>2</sup>(像面全体では2.2W)、硝材の吸収率0.001/cm、レンズ表面の薄膜による吸収率0.002という条件を与える。また、波長193nm付近での石英の物性値としては屈折率の温度変化係数dn/dT=2.2×10<sup>-5</sup> K<sup>-1</sup>、熱伝導率1.4Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>という値を用いる。

【0117】投影光学系Aに対して〔ステップ1〕から〔ステップ5〕の球面収差変動量の値についての計算を行った結果を、表2の左欄に記載する。また、投影光学系Aの球面収差変動量を図5に図示する。表2に記載した各単レンズ成分の球面収差変動量を図示したものが図5である。収差係数値の大小を比較することで、どのレンズ成分において大きな収差変動が起こるかを予測することができる。

【0118】

【表2】

投影光学系系A		投影光学系系B		
レンズ	変動量 (nm)	レンズ	変動量 (nm)	変動量/ $\Omega$
1	27.28	1	46.12	20.96
2	10.56	2	29.92	13.60
3	36.48	3	25.76	11.71
4	51.50	4	57.24	26.02
5	56.32	5	63.07	28.67
6	44.87	6	96.51	43.87
7	126.96	7	145.59	66.18
8	230.43	8	149.01	67.73
9	19.74	9	27.08	12.31
10	8.47	10	11.34	5.15
11	0.43	11	31.51	14.32
12	8.98	12	52.30	23.77
13	0.61	13	11.71	5.32
14	6.50	14	10.41	4.73
15	8.12	15	10.59	4.81
16	23.48	16	20.97	9.53
17	112.63	17	27.40	12.45
18	40.61	18	1.76	0.80
19	0.75	19	7.30	3.32
20	6.90	20	10.35	4.70
21	3.71	21	2.92	1.33
22	12.39	22	1.20	0.55
23	0.04	23	27.06	12.3
24	10.01	24	33.87	15.40
25	10.83	25	50.44	22.93
26	207.90	26	229.25	104.20
27	837.19	27	404.53	183.88
28	8071.28	28	342.73	155.79

【0119】表2の左欄及び図5から明らかなように、投影光学系Aを構成するレンズ成分のうち最も第2面（ウエハ面、像面）側の2枚のレンズ成分は通常のレンズ成分に比較して並外れて大きな収差変動を出している。このように収差係数による変動量が像面での照射強度1W当り200nmを超えるようなレンズ成分が存在すると、投影光学系全体の収差変動量がそのレンズ成分での収差変動により極端に大きくなってしまふ。つまり、これら2枚のレンズ成分を含む投影光学系Aは、光学設計上の収差は良好であるが、実際に製造するには不適切なレンズ系である。

【0120】〔投影光学系B〕（第1実施例）

面番号	r(mm)	d(mm)	硝材	レンズ半径(mm)	
物体面	$\infty$ (平面)	100.487417			
1:	300.89795	12.600000	SiO <sub>2</sub>	74.42	G1
2:	226.46683	5.157702			
3:	346.35897	22.537263	SiO <sub>2</sub>	75.15	G2
4:	-358.15162	1.000000			
5:	176.76694	24.113785	SiO <sub>2</sub>	74.51	G3
6:	-1715.74378	1.000000			
7:	164.13426	14.947329	SiO <sub>2</sub>	68.61	G4
8:	103.97013	16.525786			
9:	189.63221	12.600000	SiO <sub>2</sub>	60.72	G5
10:	108.76494	28.158835			
11:	-857.80502	13.750064	SiO <sub>2</sub>	56.06	G6
12:	159.87783	29.428581			
13:	-186.14089	13.650719	SiO <sub>2</sub>	64.08	G7

そこで、各レンズ成分に関して式(29)の値が小さくなる事を考慮して設計したレンズ系が投影光学系Bである。図2は、投影光学系Aのレンズ構成及び光路を示す図である。投影光学系Bはの仕様は、ArFエキシマレーザ(波長193.31nm)を光源として使用し、像側のNAは0.6、投影倍率は-1/4倍、フィールドサイズは25mm×8.8mmの矩形である。また、使用するレンズ枚数は28枚、レンズの硝材はすべてSiO<sub>2</sub>(屈折率1.5603)である。表3に投影光学系Bのレンズデータ等の諸元値を掲げる。

【0121】

【表3】



14:	258.91979	26.956145		
15:	-102.82764	14.479261	SiO <sub>2</sub>	80.44 G8
16:	-386.08076	13.114922		
17:	-204.61692	20.623528	SiO <sub>2</sub>	90.77 G9
18:	-144.44463	1.000000		
19:	-1106.16553	36.079048	SiO <sub>2</sub>	112.01 G10
20:	-193.30288	1.000000		
21:	1280.20913	38.741668	SiO <sub>2</sub>	126.69 G11
22:	-314.67668	1.000000		
23:	305.01880	40.739967	SiO <sub>2</sub>	128.72 G12
24:	-1275.68363	1.000000		
25:	206.80059	28.925676	SiO <sub>2</sub>	116.87 G13
26:	404.20477	5.866866		
27:	140.50535	19.589154	SiO <sub>2</sub>	99.66 G14
28:	117.88119	21.942547		
29:	154.77067	19.321593	SiO <sub>2</sub>	84.87 G15
30:	115.82184	30.593078		
31:	-401.73775	12.600000	SiO <sub>2</sub>	74.45 G16
32:	146.75863	29.570669		
33:	-160.35133	12.600000	SiO <sub>2</sub>	75.82 G17
34:	406.00536	26.749073		
35:	-703.13143	18.112121	SiO <sub>2</sub>	86.28 G18
36:	-270.09200	8.075382		
開口絞り	∞ (平面)	1.000000		
38:	813.80755	25.212520	SiO <sub>2</sub>	96.20 G19
39:	-334.72362	1.000000		
40:	336.79725	31.379965	SiO <sub>2</sub>	98.68 G20
41:	-397.82586	1.008986		
42:	-493.49368	18.000000	SiO <sub>2</sub>	97.69 G21
43:	-323.83678	29.451514		
44:	-192.42809	15.000000	SiO <sub>2</sub>	95.91 G22
45:	-902.30167	1.000000		
46:	314.31996	34.221146	SiO <sub>2</sub>	97.72 G23
47:	-364.53663	8.505778		
48:	158.22176	34.814651	SiO <sub>2</sub>	86.83 G24
49:	789.29655	3.226335		
50:	135.74145	23.912140	SiO <sub>2</sub>	71.82 G25
51:	361.44221	14.459856		
52:	-562.06092	24.000000	SiO <sub>2</sub>	59.81 G26
53:	347.00571	14.247686		
54:	535.78038	20.000000	SiO <sub>2</sub>	40.46 G27
55:	∞ (平面)	4.921244		
56:	∞ (平面)	10.000000	SiO <sub>2</sub>	29.46 G28
57:	∞ (平面)	10.000000		
像面	∞ (平面)			

【0122】図4に投影光学系Bの横収差図を示す。収差図から明らかなように、横収差が良好に補正されていることがわかる。また、投影光学系Bに対して〔ステップ1〕から〔ステップ5〕の球面収差変動量の値についての計算を行った結果を、投影レンズAに関する値と同

様に表2の右欄に示す。また、投影光学系Bの表3に記載した各単レンズ成分の球面収差変動量を図示したものが図6である。投影光学系Aの場合と同様に収差係数値の大小を比較することで、どのレンズ成分において大きな収差変動が起こるかを予測することができる。

【0123】表2の右欄から明かなように、投影光学系Bでは光照射時に極端に大きな収差変動を出しているレンズは存在しない。このように、式(29)の計算値が像面での照射強度1W当りに換算して200nm(さらに小さければより好ましい)以上になるレンズ成分を含めないように投影光学系を設計すれば、光照射による収差変動が必要以上に起こることを防止できる。

【0124】なお、収差変動量は照明光の強度に比例するので、照明光の強度を変えることにより照射変動量を変えることができる。実際、この投影レンズが百数十nm程度の線幅を投影する能力を持っていることを鑑みると、投影光学系Bのような球面収差変動量でも照明光の強度を大きくしすぎると、収差量が大きくなりすぎてしまう。しかし、この場合でも他と比べて小さな収差変動のみ起こすレンズ成分であると照明光の強度の上限値が緩められることになり、光学製品として非常に有利になる。

【0125】投影光学系Bにおいて、大きな収差変動は特に縮小側の像面近傍のレンズ成分において発生しやすい。そこで、第1実施例(投影光学系B)では、像面近傍のレンズ成分について、レンズ形状を平面に近づけてレンズ成分の両面の収差係数の和を小さくするとともに、レンズ成分を薄くしてレンズ成分内の温度ムラを小さくするなどの対策を施している。これにより投影光学系Bでは、ほぼ同等の結像性能をもつ投影レンズ系Aに比較して大幅に照射変動量を減らすことができる。また、上記説明はラジエーション・コンパクションを見積もる場合でもほぼそのまま適用できるので、第1実施例はラジエーション・コンパクションに対しても耐性の強い、即ち収差変動の少ない投影光学系になっている。

【0126】また、投影光学系Aの照射変動量のデータからわかるように、像面付近のレンズ成分はレンズ径が小さく照射密度が大きいので、照射変動を起こしやすい。特に、高NAで像側の作動距離が像高と同程度以下の投影光学系の場合に、この傾向が顕著である。そこで、照射変動の小さな投影光学系を設計する際には、この付近の値に注意を払うことが重要であり望ましい。式(6)に出てくる値の中で、像面近傍で小さくすることが可能なのは $(I_i^0 - I_i)$ の部分と $d_i R_{g1}/R_{gs}$ の部分である。

【0127】前者に関しては、レンズ成分の両面の曲率を小さくして平面に近付けることが有効である。レンズ成分が薄い場合には、これによりすべての収差係数について両面での和を小さくすることができるので、レンズ成分のGRIN化による収差係数の変動を抑えることができる。目標値としては、レンズ成分の両面への入射角の差が大きくならないように、面の曲率を $r$ 、像面と面の間隔を $l$ としたとき、 $|r| > 3l$ 程度にすればよい。

【0128】また、後者の値を小さくするためにはレンズ成分を薄くすれば良い。特に、 $R_1/R_g$ の部分については、像面近傍のレンズ成分が平面に近い場合、像側から

見た光束のNAは投影光学系のNAに近いので、同程度の厚さのレンズでもこの値は像面からの距離に反比例して大きくなる。そこで、レンズの厚さを $d$ 、像面からレンズの像側の面までの距離を $l$ としたとき、 $d < 1.2l$ 程度にすることが望ましい。

【0129】第1実施例においては、硝材として全てのレンズ成分について石英ガラス( $\text{SiO}_2$ )を使用した。硝材の違いによる収差変動の影響は主として屈折率の変化量として現れ、式(22)に示したように、

【0130】

【数31】

$$c_n = \left| \frac{dn}{dT} \frac{(2a/d)}{\lambda} \right| \quad (30)$$

【0131】という量にほぼ比例する。レンズ成分の厚さ $d$ による多少の影響はあるものの、これはほぼ硝材及びレンズ表面の薄膜の物性値によって決まる値である。この値が小さいレンズ成分を使用する場合は照射変動が小さいため、特に照射変動を考慮した設計を行わなくても照射変動値が許容範囲内に収まる可能性はある。しかし、石英ガラス(本発明の実施例の条件下で厚さ40mmのレンズ成分の場合 $c_n = 3.14 \times 10^{-6} (\text{W}^{-1})$ )等の式(30)の値が大きな値をもつ場合には照射変動を考慮した設計をしないと、投影光学系Aのように大きな照射変動が起こり得る。

【0132】(第2実施例)図7は、第2実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。基本的なレンズ構成は上記第1実施例と同様であるが、強制対流部Kを有している点が相違している。図7では、レンズ成分G21からウエハ面までの空間に対してHeの強制対流が施されている。このレンズ成分の最大像高は13.3mmであり、レンズ成分G21の第1面からウエハまでの距離が265.8mmであり、G21以下のレンズ成分が20Ymaxの範囲に入っている。そして、G21からウエハ面までに存在するレンズ成分と雰囲気との熱伝達率が良くなり、照射によってレンズ表面やレンズ内で発生した熱が雰囲気に逃げやすくなる。この結果、レンズ成分の温度上昇量が少なくなり、収差量も減少するので、より効果的となる。

【0133】(第3実施例)図8は第3実施例にかかる投影光学系のレンズ構成を示す図である。強制対流部Kによりレンズ成分G21からG28までの空間に対して $\text{N}_2$ の強制対流を行っている。 $\text{N}_2$ もHeと同様不活性ガスであり、レンズ内の雰囲気を満たす媒質として適している。そして、上記第2実施例と同様にレンズ成分G21からG28内にあるレンズ成分と雰囲気との間の熱伝達率が良くなる。この結果、照射によってレンズ表面やレンズ内で発生した熱が雰囲気に逃げやすくなるので、レンズの温度上昇量が少なくなり、収差量も減少するので、より効果である。

〔(B) 光照射による屈折率の変化のみを考慮し硝材の熱膨張による変形を無視した場合〕

上記Aでは、屈折率変化の効果のみに注目し、硝材の熱膨張の影響を無視して設計、解析を行っている。しかし、例えばCaF<sub>2</sub>のように線膨張率の比較的大きな硝材の場合、熱膨張による変形が照射変動のかなりの部分に影響することになるので、設計等に際して熱膨張の影響を無視することはできない。そこで、上記[A]で求めた屈折率変化による照射変動に加えて、熱膨張による照射変動量を計算し、両者の和を取ることが望ましい。熱膨張による照射変動は上記[A]のときとほぼ同じ手順で求め

この場合、曲率半径及びレンズ中心の厚さは硝材の線膨張率を $\alpha_l = dl / (l \cdot dT)$ として、

【0134】

$$\alpha_l = dl / (l \cdot dT)$$

$$r' = (1 + \alpha_l \Delta T(0))r, \quad d' = (1 + \alpha_l \Delta T(0))d \quad (31)$$

【0135】に変化すると考えられる。また、投影光学系の鏡筒自身は膨張しないので、レンズ間隔をレンズ成分の厚さが膨張するだけ小さくする必要がある。そこで、ここでは光路に沿ってレンズ成分の前側の空間(光路が同一レンズを往復する場合は最初に通過するときの前側)を

【0136】

【数33】

$$\Delta d_{air} = -\alpha_l \Delta T(0) d_{lens} \quad (32)$$

【0137】だけ変化させることとする。

【0138】ステップ2以降についての手順は上記[A]

$$\Delta SA_g = -\frac{1}{2}(NA)^3 \left\{ \sum_{i=g}^n [(I_{GRIN,i} - I_i) - (I_{Exp,i} - I_i)] \right\} \frac{d_g}{y_{im\max}} \cdot \frac{R_{gl}}{R_{gs}} \cdot \frac{\bar{h}/h^2}{|h|_{\max}/|h|_{\max}^2} \quad (34)$$

【0143】という形で収差変動量を評価できる。

【0144】次に、光照射の影響を考慮しないで従来の設計手順による投影光学系Cと、上記各ステップに基づいて設計した投影光学系D(第4実施例)とに基づいて両者を比較して説明する。

【0145】[投影光学系C]投影光学系Cは、照射の影響を特に考慮せずに設計された投影光学系である。図9は、投影光学系Cのレンズ構成と光路を示す図である。投影光学系Cの仕様は、F<sub>2</sub>レーザ(波長157.6nm)を光源

$$z(\rho) = \frac{\rho^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)\rho^2/r^2}} + A\rho^4 + B\rho^6 + C\rho^8 + D\rho^{10} \quad (35)$$

【0147】で表される。ここで、 $\rho$ は光軸からの高さ、 $z$ はサグ量、 $\kappa$ は円錐定数、 $A \sim D$ は非球面係数である。そして、 $\kappa$ の値はすべて0である。なお、式(25)に登場する非球面パラメータ $\Psi$ は、ここでの非球面係数Aを使って、

【0148】

【数37】

ることができる。ただし、ステップ1で屈折率変化のパラメータを求める代わりに、下記の[ステップ1']としてレンズ成分の温度上昇による膨張分としてレンズの厚さ、曲率を変化させる。

[ステップ1'] 上記[A]の式(20)で求めたレンズ中心での温度上昇により、レンズ成分を構成する硝材が膨張し、レンズ成分の曲率半径及びレンズ成分の厚さが増加すると仮定する。

【数32】

と同様である。ただし、ステップ3において、レンズ成分をGRIN化する必要はない。このような手順で、

【0139】

【数34】

$$\Delta SA = -\frac{1}{2}(NA)^3 \sum_{i=k}^n (I_{Exp,i} - I_i) \quad (33)$$

【0140】として収差変動量が求められる。

【0141】最終的には、収差変動量は屈折率変化による量と熱膨張による量の和となるので、

【0142】

【数35】

として使用し、像側のNAは0.75、投影倍率は-1/4倍、フィールドサイズは25mm×6.6mmの矩形である。使用するレンズ枚数は12枚(このうち10枚は非球面)、レンズ成分の硝材はすべてCaF<sub>2</sub>(屈折率1.56)である。この投影光学系Cのレンズデータ等を含む諸元値を表4に掲げる。なお、非球面は次式、

【0146】

【数36】

$$\Psi = (n' - n) \left( \frac{\kappa}{r^3} + 8A \right) \quad (6)$$

【0149】と表せる。また、投影光学系Cは反射屈折光学系であり、露光に利用するのは光軸を含まない部分で、像面上で光軸から矩形の長辺に垂線を下したときに、光軸から4~10.6mmの領域を使用する。以下の表4に投影光学系Cのレンズデータ等の諸元値掲げる。な

お、以下全ての実施例の非球面データ欄における最左端  
は面番号を示し、非球面係数中の「E-n」は「 $\times 10^{-n}$ 」  
「 $\mu$ 」を意味する。

【0150】

【表4】

面番号	r(mm)	d(mm)	硝材	レンズ半径(mm)
物体面 :	$\infty$ (平面)	48.716588		
1:	-902.32425	21.200000	CaF <sub>2</sub>	83.78 G1
2:	972.38615	2.000000		
3:	939.84090	28.000000	CaF <sub>2</sub>	88.48 G2
4:	-4.4558E+06	70.100000		
5:	494.67313	60.000000	CaF <sub>2</sub>	112.56 G3
6:	-501.42562	620.932689		
7:	-213.07325	27.000000	CaF <sub>2</sub>	129.99 G4
8:	3980.51678	33.372907		
9:	-295.29470	-33.372907	(反射面)	
10:	3980.51678	-27.000000	CaF <sub>2</sub>	129.99 (G4)
11:	-213.07325	-620.932689		
12:	-501.42562	-60.000000	CaF <sub>2</sub>	112.56 (G3)
13:	494.67313	-8.600000		
14:	$\infty$ (平面)	410.000000	(反射面)	
15:	$\infty$ (平面)	-91.300195	(反射面)	
16:	-1366.53095	-38.000000	CaF <sub>2</sub>	134.40 G5
17:	765.06874	-296.216610		
18:	895.13557	-44.000000	CaF <sub>2</sub>	125.63 G6
19:	586.42208	-10.351339		
20:	-195.92152	-54.000000	CaF <sub>2</sub>	123.69 G7
21:	1201.07800	-0.100000		
開口絞り:	$\infty$ (平面)	-6.102736		
23:	1291.12530	-24.000000	CaF <sub>2</sub>	120.57 G8
24:	-439.19170	-55.806043		
25:	-141.31398	-54.000000	CaF <sub>2</sub>	107.14 G9
26:	-554.75457	-3.065662		
27:	-435.69376	-38.837466	CaF <sub>2</sub>	97.23 G10
28:	-201.60462	-0.100000		
29:	-109.45667	-32.000000	CaF <sub>2</sub>	74.69 G11
30:	-444.87553	-5.376816		
31:	-166.66667	-60.000000	CaF <sub>2</sub>	61.85 G12
32:	1276.38962	-11.648728		
像面:	$\infty$ (平面)			
非球面係数				
1:	A=-0.214159E-07	B=-0.663891E-13	C=-0.620086E-18	D=0.646360E-22
6:	A=0.292086E-09	B=0.608884E-13	C=0.189576E-18	D=0.248986E-23
7:	A=0.114683E-07	B=0.234055E-12	C=0.197396E-17	D=0.115657E-21
11:	A=0.114683E-07	B=0.234055E-12	C=0.197396E-17	D=0.115657E-21
12:	A=0.292086E-09	B=0.608884E-13	C=0.189576E-18	D=0.248986E-23
17:	A=-0.149953E-08	B=0.272877E-13	C=0.120921E-18	D=0.975385E-23
19:	A=-0.195275E-08	B=0.193308E-12	C=-0.105482E-17	D=-0.225116E-21
21:	A=-0.150856E-07	B=-0.346364E-12	C=0.204337E-16	D=-0.335479E-21
26:	A=0.398984E-08	B=0.842883E-12	C=-0.280888E-16	D=-0.206482E-21
28:	A=-0.858225E-08	B=0.294569E-12	C=-0.184345E-15	D=-0.578509E-19
30:	A=-0.207889E-06	B=-0.614138E-11	C=0.485860E-16	D=0.346356E-19

32: A=-0.272031E-08 B=0.384574E-11 C=-0.803667E-15 D=-0.225387E-17

【0151】投影光学系Cの横収差図を図11に示す。収差図からわかるように、照射の影響を考慮しない限り、本レンズの収差は良好に補正されている。

【0152】照射に関する条件としては、照明光のNAは投影レンズの0.6倍、像面上での照度 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$ (像面全体では $0.165\text{W}$ )、硝材の吸収率 $0.005/\text{cm}$ 、レンズ表面の薄膜による吸収率 $0.01$ という条件を与える。また、波長 $157\text{nm}$ 付近での螢石の物性値としては屈折率の温度変化係数 $dn/dT=3.0\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ 、熱伝導率 $9.7\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 、線膨張率 $2.4\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ という値を使用する。螢石の $dn/dT$ は波長 $193$

$\text{nm}$ における石英ガラスの値よりも、かなり小さく、また、線膨張率は石英ガラスの $5.2\times 10^{-7}\text{K}^{-1}$ と比べると大きい、熱膨張による効果が大いことが予測される。

【0153】投影光学系Cに関して、上記手順で球面収差変動量の値についての計算を行った結果を表5の左欄に記載する。また、表5では屈折率変化と膨張のそれぞれに起因する収差変動の寄与量も示している。

【0154】

【表5】

投影光学系C レンズ変動量(屈折率(膨張) (nm) 変化)				投影光学系D レンズ変動量(屈折率(膨張) (nm) 変化) 変動量/ $\Omega$ (nm)				
1	4.84	2.32	2.52	1	7.73	0.55	7.18	46.85
2	8.21	1.79	6.42	2	1.84	2.80	0.95	11.15
3	5.72	3.74	1.97	3	0.24	2.51	2.76	1.45
4	1.09	0.73	1.82	4	0.86	0.57	1.44	5.21
5	1.48	0.44	1.92	5	1.61	0.73	2.34	9.76
6	0.00	0.00	0.01	6	0.01	0.00	0.02	0.06
7	0.45	0.30	0.75	7	0.07	0.32	0.39	0.42
8	0.04	0.05	0.02	8	0.38	0.13	0.25	2.30
9	0.33	1.74	2.08	9	1.13	0.71	0.41	6.85
10	0.58	0.69	0.11	10	2.62	4.69	2.07	15.88
11	3.76	2.33	1.44	11	6.13	5.39	0.73	37.15
12	421.14	377.23	43.91	12	15.31	21.71	6.40	92.79
				13	11.88	5.97	17.85	72.00

【0155】また、投影光学系Cの各レンズ成分についての球面収差変動量を図13に示す。表5から明らかに、投影光学系Cの最も像面側のレンズ成分は、投影光学系Aの時と同様に、極端に大きな収差変動を発生している。従って、このレンズ成分も、実際に製造するには不適である。また、この大きな収差変動の大部分は屈折率変化によって生じている。このため、線膨張率が大きく熱膨張による寄与が比較的大きな硝材においても、極端に大きな収差変動は膨張でなく屈折率の温度による変化が原因となることがわかる。

【投影光学系D(第4実施例)】そこで、上記投影光学系Cのような大きな収差変動を起こさないように設計したレンズが投影光学系Dである。投影光学系Dのレンズ構成と光路とを図10に示す。投影光学系Dの仕様は、

$F_2$ レーザ(波長 $157.6\text{nm}$ )を光源として使用し、像側のNAは $0.75$ 、投影倍率は $-1/4$ 倍、フィールドサイズは $25\text{mm}\times 6.6\text{mm}$ の矩形であり、上記投影光学系Cと同一の仕様であり、光学系のタイプ、露光に使用する領域も同じである。ただし、投影光学系Dを構成するレンズ成分は投影光学系Cよりも1枚多い13枚(このうち11枚は非球面)である。レンズ成分の硝材はすべて $\text{CaF}_2$ (屈折率 $1.56$ )である。また、投影光学系Dのレンズデータ等の諸元値を表6に掲げる。なお、データ中の非球面係数の意味は上記投影光学系Cの場合と同じであり、ここでも $\kappa$ の値はすべて0である。

【0156】

【表6】

面番号	r(mm)	d(mm)	硝材	レンズ半径(mm)	
物体面:	$\infty$ (平面)	50.201211			
1:	-605.25116	21.200000	$\text{CaF}_2$	81.93	G1
2:	-276.89370	3.396443			
3:	-315.02548	28.000000	$\text{CaF}_2$	88.72	G2
4:	-14082.96583	70.100000			
5:	558.03330	44.000000	$\text{CaF}_2$	111.67	G3
6:	-451.41879	630.367092			
7:	-198.60978	27.000000	$\text{CaF}_2$	132.46	G4
8:	-10660.50735	33.509385			
9:	-297.62817	-33.509385	(反射面)		
10:	-10660.50735	-27.000000	$\text{CaF}_2$	132.46	(G4)
11:	-198.60978	-630.367092			

12:	-451.41879	-44.000000	CaF <sub>2</sub> 111.67 (G3)
13:	558.03330	-8.600000	
14:	∞ (平面)	410.000000	(反射面)
15:	∞ (平面)	-102.156386	(反射面)
16:	8352.72256	-38.000000	CaF <sub>2</sub> 135.00 G5
17:	479.60692	-314.606963	
18:	4887.61524	-44.000000	CaF <sub>2</sub> 130.32 G6
19:	497.51522	-15.028411	
ST0:	∞ (平面)	-0.101334	
21:	-219.21488	-54.000000	CaF <sub>2</sub> 123.78 G7
22:	948.39033	-14.571726	
23:	805.91162	-24.000000	CaF <sub>2</sub> 117.88 G8
24:	-841.39903	-33.236117	
25:	-143.82988	-40.000000	CaF <sub>2</sub> 102.75 G9
26:	-451.10387	-6.553823	
27:	-438.46804	-39.515334	CaF <sub>2</sub> 94.77 G10
28:	1805.86227	-8.112353	
29:	-258.01179	-28.669495	CaF <sub>2</sub> 71.03 G11
30:	-273.05607	-7.775164	
31:	-150.32113	-25.000000	CaF <sub>2</sub> 51.37 G12
32:	∞ (平面)	-3.149370	
33:	-3021.15486	-10.000000	CaF <sub>2</sub> 38.11 G13
34:	∞ (平面)	-10.000000	
像面:	∞ (平面)	0.000000	

## 非球面係数

1:	A=-0.211553E-07	B=-0.100996E-13	C=-0.355437E-17	D=0.463473E-21
6:	A=0.454322E-09	B=0.630510E-13	C=0.479038E-18	D=-0.277738E-24
7:	A=0.937661E-08	B=0.234086E-12	C=0.256411E-17	D=0.198402E-21
11:	A=0.937661E-08	B=0.234086E-12	C=0.256411E-17	D=0.198402E-21
12:	A=0.454322E-09	B=0.630510E-13	C=0.479038E-18	D=-0.277738E-24
17:	A=-0.476242E-08	B=0.458509E-13	C=0.522751E-18	D=0.804209E-23
19:	A=-0.120869E-08	B=0.615670E-13	C=0.114607E-17	D=-0.194528E-21
22:	A=-0.181140E-07	B=-0.168833E-12	C=0.107771E-17	D=0.140904E-21
24:	A=0.601415E-08	B=0.186733E-12	C=0.107098E-16	D=-.828175E-21
26:	A=0.478425E-08	B=0.490644E-12	C=-0.543931E-18	D=-0.761183E-21
28:	A=-0.453161E-07	B=-0.192148E-11	C=0.122436E-15	D=-0.543892E-21
30:	A=-0.133589E-06	B=0.173508E-10	C=-0.153242E-14	D=0.131086E-18
31:	A=-0.598282E-07	B=0.256984E-10	C=0.755816E-15	D=0.185573E-18

【0157】投影光学系Dの横収差を図12に示す。収差図からわかるように、照射の影響がない段階では、本光学系の収差は投影光学系Cとほぼ同程度に補正されている。

【0158】また、照射に関する条件も投影光学系Cの場合と同じである。投影光学系Dについて球面収差変動量の値についての計算を行った結果を表6の右欄に示す。また、投影光学系Dの各レンズ成分の球面収差変動量を図14に示す。

【0159】表5からわかるように、投影光学系Dには照射時に極端に大きな収差変動を出しているレンズは存

在しない。このように、式(34)の値が像面での照射強度1W当りに換算して200nm程度以上になるレンズが存在しないように投影光学系を設計すれば、照射による大きな収差変動を防ぐことができる。

【0160】レンズ成分の熱膨張による変形を考慮に入れた場合でも、特に縮小側の像面近傍のレンズ成分において大きな収差変動が生じ易い傾向がある。そこで、第4実施例にかかる投影光学系では、像面近傍のレンズ成分について上記投影光学系Bの場合と同様の設計手順により、ほぼ同等の結像性能を有する投影光学系Cに比較して大幅に光照射による収差変動量を減らすことができ

る。また、上記の議論はラジエーション・コンパクションの量を見積もる場合でもほぼそのまま適用できるので、本実施例はラジエーション・コンパクションに対しても耐性の強い投影光学系にもなっている。

【0161】また、本実施例にかかる投影光学系Dの硝材はすべて螢石( $\text{CaF}_2$ )を使用している。 $\text{CaF}_2$ は第1実施例にかかる投影光学系Bにおいて使用した $\text{SiO}_2$ と比較して熱伝導率が大きく、屈折率の温度変化係数が小さい。このため、式(22)からわかる単位発熱量当りの屈折率変化による影響は小さく、さらに、線膨張率が大きいために硝材の膨張による影響は大きくなる。しかし、この場合でも大きな収差変動を引き起こすのは主として屈折率変化の影響であり、式(30)によって硝材による大きな収差変動の発生を見積もることができる。上述の実施例の条件下で厚さ40mmの $\text{CaF}_2$ のレンズの場合式(30)の値は $c_n = 3.09 \times 10^{-7} (\text{W}^{-1})$ であり、 $\text{SiO}_2$ の場合よりほぼ一桁小さい。しかし、この場合でも照射による収差変動を小さくするための対策を施した方が望ましい。好ましくは、収差変動値から考えて、 $c_n$ の値が $\text{CaF}_2$ の場合よりさらに一桁程度小さい硝材を使うのでない限り、像面近傍の収差変動に留意して光学設計を行うことが望ましい。

【0162】なお、本実施例においては中間像のNAが小さいため、中間像の近傍では大きな照射変動が生じていない。しかし、中間像の大きさが小さく、NAが大きいようなタイプの光学系の場合は、中間像近傍のレンズ成分は径が小さく、照射密度が大きいことが多い。したがって、中間像近傍においても大きな照射変動が起こり易いので式(1)を満足することが望ましい。

【0163】また、従来の技術で上述したように、照射変動に対する要求が特に厳しくなってきたのは、波長が200nm以下の露光光を用いて、焼き付け線幅も200nm以下であるような場合である。このため、200nm以下の露光光を用いた投影光学系において特に本発明は有効である。

【0164】(第5実施例)図15は、上記各実施例にかかる投影光学系を備える投影露光装置の概略構成を示す図である。なお、図15において、投影光学系を構成する反射屈折光学系8の光軸AXに平行にZ軸を、光軸AXに垂直な面内において図1の紙面に平行にX軸を、紙面に垂直にY軸を設定している。

【0165】図示の投影露光装置は、紫外領域の照明光を供給するための光源として、たとえば $\text{F}_2$ レーザ(発振中心波長157.6nm)を備えている。光源1から射出された光は、照明光学系2を介して、所定のパターンが形成されたマスク3を均一に照明する。

【0166】なお、光源1から照明光学系2までの光路には、必要に応じて光路を偏向するための1つ又は複数の折り曲げミラーが配置される。また、光源1と投影露光装置本体とが別体である場合には、光源1からの $\text{F}_2$ レーザ光の向きを常に投影露光装置本体へ向ける自動追

尾ユニットや、光源1からの $\text{F}_2$ レーザ光の光束断面形状を所定のサイズ・形状に整形するための整形光学系、光量調整部などの光学系が配置される。また、照明光学系2は、例えばフライアイレンズや内面反射型インテグレートタからなり所定のサイズ・形状の面光源を形成するオプティカルインテグレートタや、マスク3上での照明領域のサイズ・形状を規定するための視野絞り、この視野絞りの像をマスク上へ投影する視野絞り結像光学系などの光学系を有する。

【0167】マスク3は、マスクホルダ4を介して、マスクステージ5上においてXY平面に平行に保持されている。マスク3には転写すべきパターンが形成されており、パターン領域全体のうちY方向に沿って長辺を有し且つX方向に沿って短辺を有する矩形状(スリット状)のパターン領域が照明される。マスクステージ5は、図示を省略した駆動系の作用により、マスク面(すなわちXY平面)に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はマスク移動鏡6を用いた干渉計7によって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【0168】マスク3に形成されたパターンからの光は、反射屈折型の投影光学系8を介して、感光性基板であるウエハ9上にマスクパターン像を形成する。ウエハ9は、ウエハホルダ10を介して、ウエハステージ11上においてXY平面に平行に保持されている。そして、マスク3上での矩形状の照明領域に光学的に対応するように、ウエハ9上ではY方向に沿って長辺を有し且つX方向に沿って短辺を有する矩形状の露光領域にパターン像が形成される。

【0169】ウエハステージ11は、図示を省略した駆動系の作用によりウエハ面(すなわちXY平面)に沿って二次元的に移動可能であり、その位置座標はウエハ移動鏡12を用いた干渉計13によって計測され且つ位置制御されるように構成されている。

【0170】また、光源1からウエハ9までの光路の全体に亘って窒素やヘリウムガスなどの不活性ガスが充填され、露光光がほとんど吸収されることのない雰囲気形成されている。

【0171】上述したように、投影光学系8によって規定されるマスク3上の視野領域(照明領域)及びウエハ9上の投影領域(露光領域)は、X方向に沿って短辺を有する矩形状である。従って、駆動系及び干渉計(7, 13)などを用いてマスク3及びウエハ9の位置制御を行いながら、矩形状の露光領域及び照明領域の短辺方向すなわちX方向に沿ってマスクステージ5とウエハステージ11とを、ひいてはマスク3とウエハ9とを同期的に移動(走査)させることにより、ウエハ9上には露光領域の長辺に等しい幅を有し且つウエハ9の走査量(移動量)に応じた長さを有する領域に対してマスクパターンが走査露光される。

【0172】さて、本発明は、ウエハ上の1つのショッ

ト領域へマスクパターン像を一括的に転写した後に、投影光学系の光軸と直交する面内でウエハを逐次二次元的に移動させて次のショット領域にマスクパターン像を一括的に転写する工程を繰り返すステップ・アンド・リピート方式（一括露光方式）や、ウエハの各ショット領域への露光時にマスクとウエハとを投影光学系に対して投影倍率 $\beta$ を速度比として同期走査するステップ・アンド・スキャン方式（走査露光方式）の双方に適用することができる。なお、ステップ・アンド・スキャン方式では、スリット状（細長い矩形状）の露光領域内で良好な結像特性が得られればよいとため、投影光学系を大型化することなく、ウエハ上のより広いショット領域に露光を行うことができる。

【0173】ところで、上述の各実施例では、半導体素子の製造に用いられる投影露光装置に本発明を適用している。しかしながら、半導体素子の製造に用いられる露光装置だけでなく、液晶表示素子などを含むディスプレイの製造に用いられる、デバイスパターンをガラスプレート上に転写する露光装置、薄膜磁気ヘッドの製造に用いられる、デバイスパターンをセラミックウエハ上に転写する露光装置、撮像素子（CCDなど）の製造に用いられる露光装置などにも本発明を適用することができる。また、レチクルまたはマスクを製造するためにガラス基板またはシリコンウエハなどに回路パターンを転写する露光装置にも、本発明を適用することができる。

【0174】なお、本発明は上述の実施の形態に限定されことなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲で種々の構成を取り得ることはいうまでもない。

【0175】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、光照射による収差変動の小さな投影光学系を得ることができる。また、本発明にかかる投影光学系を備えた投影露光装置によれば、露光時の光照射による変動が小さいので常に安定して微細なパターンを投影露光することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】投影光学系Aのレンズ構成と光路を示す図である。

【図2】投影光学系B（第1実施例）のレンズ構成と光路を示す図である。

【図3】投影光学系Aの横収差を表す収差図である。

【図4】投影光学系Bの横収差を表す収差図である。

【図5】投影光学系Aにおける各レンズ成分ごとの球面収差変動量への寄与を示す図である。

【図6】投影光学系Bにおける各レンズ成分ごとの球面収差変動量への寄与を示す図である。

【図7】第2実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。

【図8】第3実施例にかかる投影光学系の構成を示す図である。

【図9】投影光学系Cのレンズ構成と光路を示す図である。

【図10】投影光学系D（第4実施例）のレンズ構成と光路を示す図である。

【図11】投影光学系Cの横収差を表す収差図である。

【図12】投影光学系Dの横収差を表す収差図である。

【図13】投影光学系Cにおける各レンズ成分ごとの球面収差変動量への寄与を示す図である。

【図14】投影光学系Dにおける各レンズ成分ごとの球面収差変動量への寄与を示す図である。

【図15】上記各実施例にかかる投影光学系を備える投影露光装置の構成を示す図である。

【符号の説明】

G<sub>i</sub> 各レンズ成分（ $i = 1, 2, \dots, 28$ ）

S 開口絞り

1 レーザ光源

2 照明光学系

3 マスク

4 マスクホルダ

5 マスクステージ

6, 12 移動鏡

7, 13 干渉計

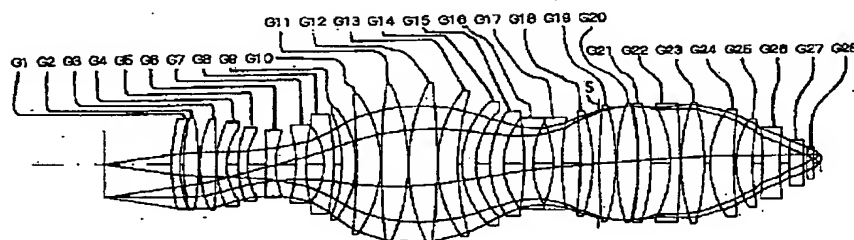
8 投影光学系

9 ウエハ

10 ウエハホルダ

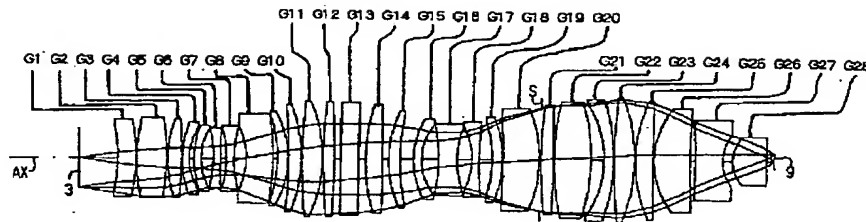
11 ウエハステージ

【図2】

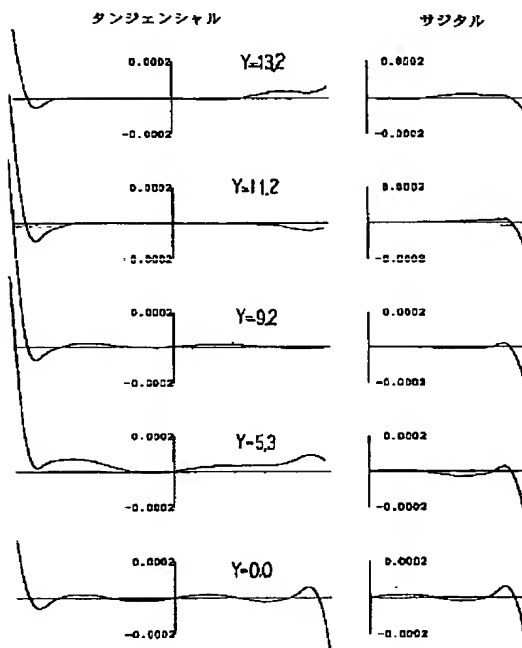




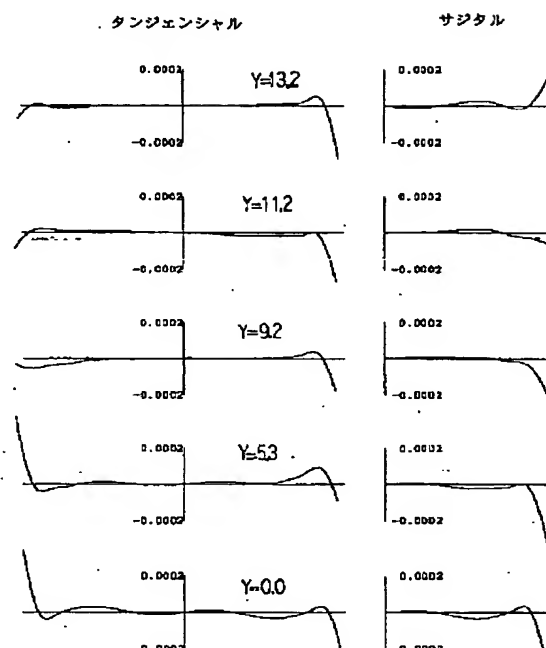
【図1】



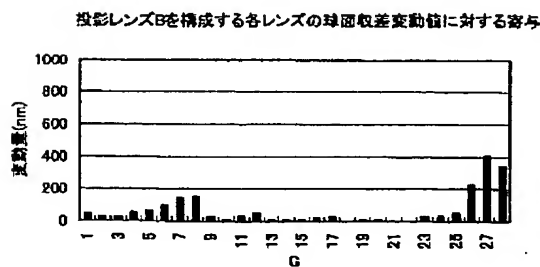
【図3】



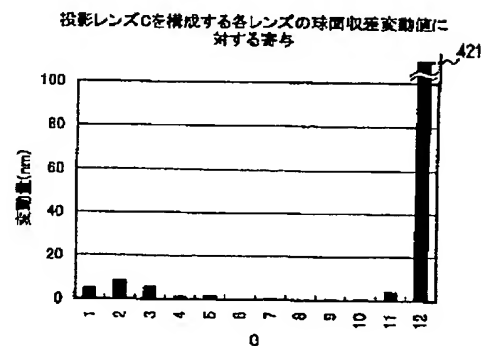
【図4】



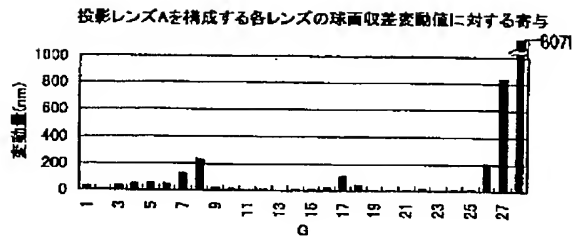
【図6】



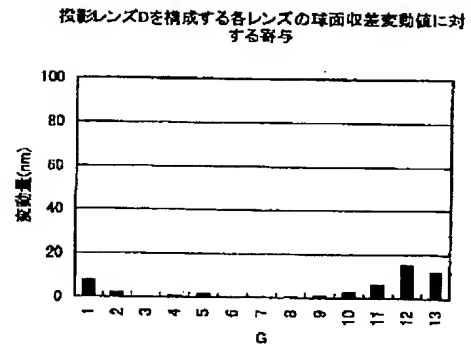
【図13】



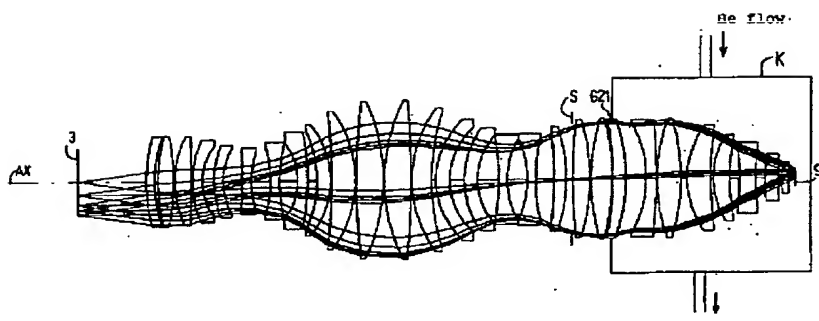
【図5】



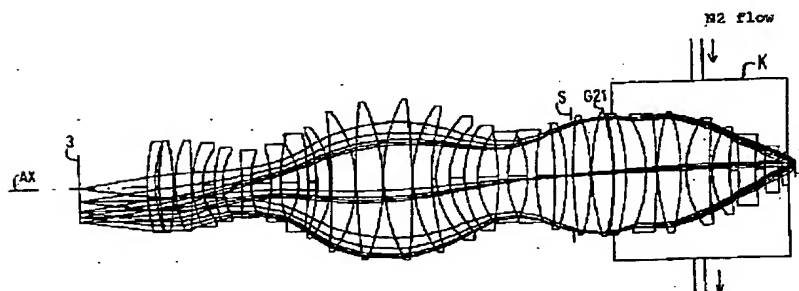
【図14】



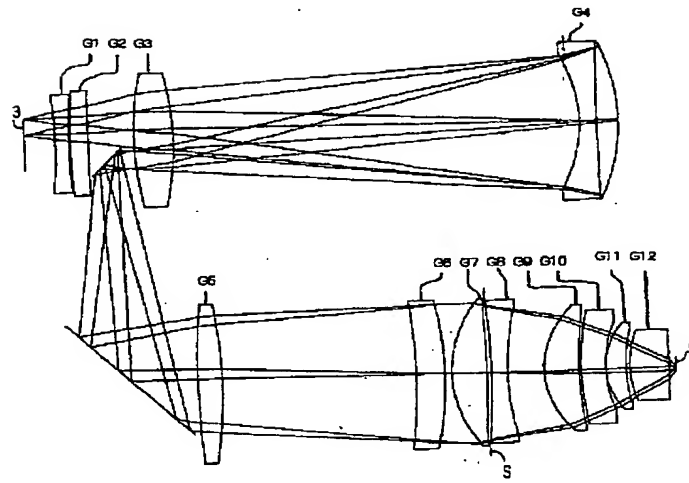
【図7】



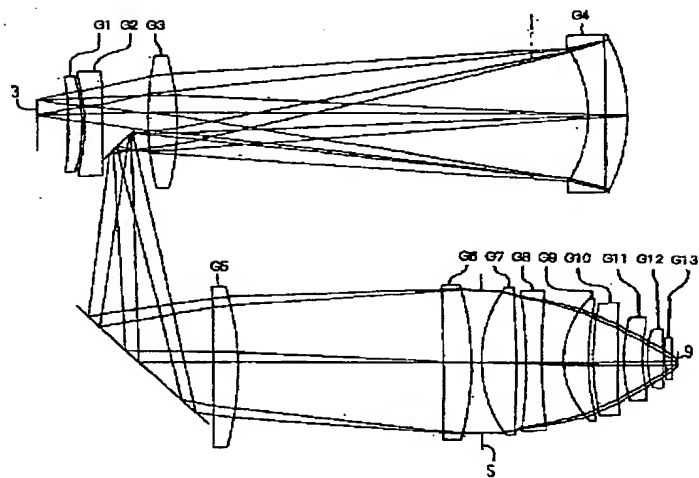
【図8】



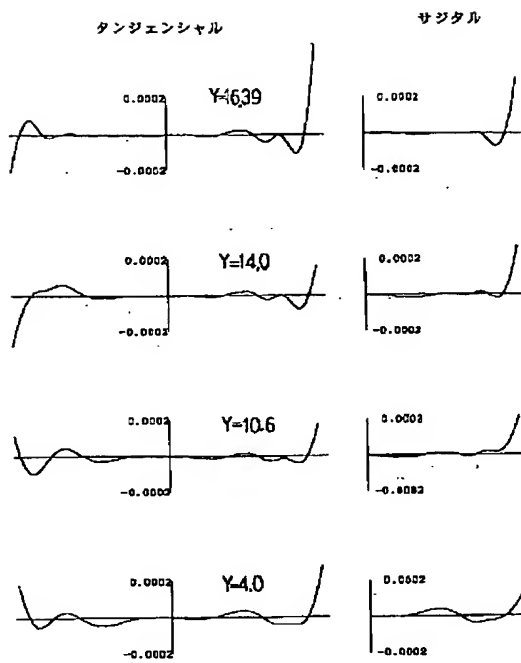
【図9】



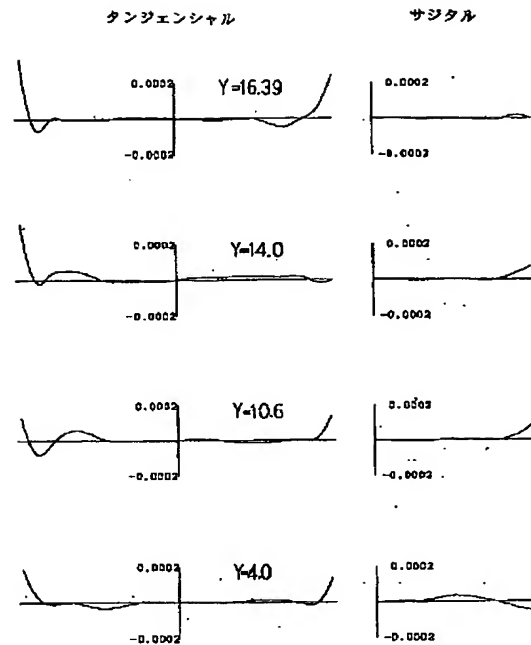
【図10】



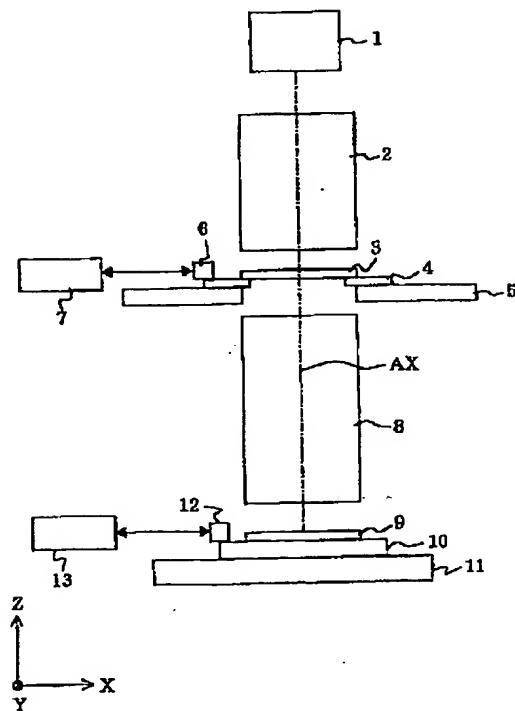
【図11】



【図12】



【図15】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2H087 KA21 LA01 NA04 PA15 PA17  
 PB20 QA02 QA03 QA05 QA06  
 QA12 QA17 QA19 QA21 QA25  
 QA32 QA33 QA39 QA42 QA45  
 RA05 RA13 RA32 RA42 UA03  
 UA04  
 5F046 BA05 CA04 CB12 DA12 DA27  
 DB03